



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2011

**Susana Marques
Laranjeira**

**Estudo do Comportamento ao Atrito e Desgaste de
Poliamidas**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2011

**Susana Marques
Laranjeira**

Estudo do Comportamento ao Atrito e Desgaste de Poliamidas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha filha Diana, com a esperança de que um dia olhe para ele e compreenda que na vida tudo se consegue com amor, esforço e dedicação.

o júri

Presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António Paulo Monteiro Baptista

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim, por toda a disponibilidade e dedicação na orientação deste trabalho.

Aos meus pais, Alice e Joaquim, pelo apoio e investimento realizado ao longo de todos estes anos.

Ao Nuno por toda a dedicação e compreensão nos momentos mais difíceis desta caminhada.

palavras-chave

Atrito; desgaste; poliamida; tribologia ; tribometro pino sobre disco.

resumo

No presente trabalho, realizou-se um estudo ao comportamento tribológico da poliamida 66 (PA66), da poliamida 66 com adição de bissulfureto de molibdênio (PA66+MoS₂), e da poliamida 66 com 30% de reforço de fibra de vidro, (PA66GF30). Os ensaios foram realizados num tribômetro de pino sobre disco. O material da contraface de deslizamento utilizado foi o aço CK45. A avaliação do comportamento tribológico dos materiais em estudo foi estruturada em quatro fases distintas.

Numa primeira fase, realizou-se um estudo comparativo do comportamento ao atrito e desgaste da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, seguida de uma segunda fase, onde se estudou a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico. Numa terceira fase, estudou-se a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30. A última fase englobou um estudo do comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30 em meio aquoso.

O material que apresentou maior resistência ao desgaste e menor coeficiente de atrito nos ensaios efectuados foi a PA66GF30.

keywords

Friction; wear; polyamide; tribology; pin-on-disc.

abstract

In present work was studied the tribological behaviour of polyamide 66 (PA66), polyamide 66 filled with molybdenum disulfide (PA66+MoS₂) and polyamide with 30% of glass fibre reinforcement (PA66GF30). The experiments were carried out on a pin-on-disc machine; the material of disc was a steel CK45. The evaluation of the tribological behaviour of those materials was structured into four distinct phases.

In the first phase, was made a comparative study on the friction and wear of the PA66, PA66+MoS₂ and PA66GF30, was followed by a second phase, where was studied the influence of contact pressure in the tribological behaviour. In a third phase, was studied the influence of sliding velocity in the tribological behaviour of PA66+MoS₂ and PA66GF30. The last phase includes a study with PA66+MoS₂ and PA66GF30 in aqueous environment.

The tests performed allowed to conclude that the material with the lower coefficient of friction and higher wear resistance was PA66GF30.

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vi
Simbologia e Abreviaturas.....	viii
Introdução	1
1.1 Generalidades	3
1.2 Organização do presente trabalho	5
2. Tribologia das poliamidas	7
2.1 Introdução	9
2.2 Poliamidas	11
2.3 Comportamento tribológico das poliamidas	13
2.3.1 Parâmetros que influenciam o comportamento tribológico das poliamidas.....	14
2.4 Compósitos de poliamida.....	18
2.5 Síntese	20
3. Prodimento experimental.....	25
3.1 Materiais ensaiados	27
3.1.1 Poliamida66 (PA66)	27
3.1.2 Poliamida reforçada com fibra de vidro (PA66GF30)	27
3.1.3 Poliamida com adição de MoS ₂	28
3.1.4 Propriedades dos materiais utilizados	28
3.1.5 Material antagonista	30
3.2 Tribómetro pino sobre disco	30
3.2.1 Geometria dos pinos e do disco	32
3.3 Metodologia experimental	32
3.4 Determinação do coeficiente de atrito e de desgaste.....	33
3.5 Análise das superfícies desgastadas	34
4. Resultados obtidos e sua discussão	35

4.1	Comportamento tribológico de cada material PA66, PA66+MoS ₂ e PA66GF30.....	38
4.1.1	Comparação do comportamento tribológico dos três materiais em estudo.....	38
4.2	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de cada material.....	42
4.2.1	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66.....	42
4.2.2	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66+MoS ₂	46
4.2.3	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66GF30.....	49
4.3	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS ₂ e da PA66GF30.....	53
4.3.1	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS ₂	53
4.3.2	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66GF30.....	57
4.4	Comportamento tribológico da PA66+MoS ₂ e da PA66GF em meio aquoso.....	60
4.4.1	Estudo tribológico da PA66+MoS ₂ em meio aquoso.....	60
4.4.2	Estudo tribológico da PA66GF30 em meio aquoso.....	63
5.	Conclusões.....	67
	Referências.....	75
	Anexo.....	79
A.	Manual de utilização simplificado Tribómetro PLINT TE67.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplos de algumas aplicações das poliamidas.	4
Figura 1.2: Quantidade de artigos científicos publicados entre 2000 e 2010, com estudos efectuados na área da tribologia com poliamidas.....	5
Figura 2.1: Representação esquemática de alguns dos parâmetros relevantes que condicionam o comportamento ao desgaste e ao atrito de um material.	10
Figura 2.2: Estrutura química de um monómero de PA66 e PA6.....	11
Figura 2.3: Exemplos de algumas aplicações das poliamidas.	12
Figura 2.4: Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento tribológico das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico.....	14
Figura 3.1:Tribómetro de pino sobre disco da phoenix-tribology (série TE67/HT).....	30
Figura 3.2: Adaptadores utilizados durante o ensaio para colocação das amostras.	32
Figura 3.3: Microscópio óptico série Eclipse Lv150 utilizado para a observação da superfície dos discos e das amostras.	34
Figura 4.1: Evolução do coeficiente de atrito da PA66, da PA66+MoS ₂ e da PA66GF30, em função da distância de deslizamento para uma pressão de contacto de 1.46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0.48 m/s.....	39
Figura 4.2: Evolução da temperatura da PA66, da PA66+MoS ₂ e da PA66GF30, em função da distância de deslizamento para uma pressão de contacto de 1.46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0.48 m/s.....	39
Figura 4.3:Coeficiente de desgaste, W, da PA66, da PA66+MoS ₂ e da PA66GF30, para uma pressão de contacto de 1.46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0.48m/s.	40
Figura 4.4:Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaio com P _v =0.7 MPa.m/s.	41
Figura 4.5: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66, para diferentes pressões de contacto.....	43
Figura 4.6: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento da PA66, para diferentes pressões de contacto.	43
Figura 4.7: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste W, da PA66, nos ensaios com diferentes pressões de contacto.	44
Figura 4.8:Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66 com diferentes pressões de contacto.	45
Figura 4.9:Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66+MoS ₂ , para diferentes pressões de contacto.....	46
Figura 4.10: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados à PA66+MoS ₂ , a diferentes pressões de contacto.	47

Figura 4.11: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS ₂ em função da pressão de contacto aplicada.....	47
Figura 4.12: Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66+MoS ₂ a diferentes pressões de contacto.	49
Figura 4.13: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66GF30, para diferentes pressões de contacto.	50
Figura 4.14: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para diferentes pressões de contacto.	50
Figura 4.15: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66GF30, em função da pressão de contacto.	51
Figura 4.16: Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66GF30 a diferentes pressões de contacto.	52
Figura 4.17: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66+MoS ₂ , para as diferentes velocidades de deslizamento.	53
Figura 4.18: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66+MoS ₂ para as diferentes velocidades de deslizamento.	54
Figura 4.19: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS ₂ , em função da velocidade de deslizamento.	55
Figura 4.20: Amostra da PA66+MoS ₂ , após o ensaio com a velocidade de deslizamento de 1.5m/s.	55
Figura 4.21: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios da PA66+MoS ₂ a diferentes velocidades de deslizamento.	56
Figura 4.22: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para as diferentes velocidades de deslizamento.	57
Figura 4.23: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para as diferentes velocidades de deslizamento.	57
Figura 4.24: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66GF30, em função da velocidade de deslizamento.	58
Figura 4.25: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66GF30 a diferentes velocidades de deslizamento.	59
Figura 4.26: Imagens das amostras (MO 50x), após a realização de ensaios da PA66GF30 com a velocidade de deslizamento de 1.0 m/s e com a velocidade de 1.5 m/s.	60
Figura 4.27: Variação do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento, da PA66+MoS ₂ , para um ensaio a seco e um ensaio meio aquoso.	61
Figura 4.28: Coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS ₂ , do ensaio a seco e em meio aquoso.	61
Figura 4.29: Imagem da amostra de MoS ₂ , após o ensaio e o material que estava depositado no pino e no adaptador.	62

Figura 4.30: Imagens da superfície dos discos obtidas (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66+MoS ₂ a seco e em meio aquoso.....	63
Figura 4.31: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para um ensaio a seco e num ensaio em meio aquoso.	63
Figura 4.32: Coeficiente de desgaste, W, da PA66GF30, do ensaio a seco e meio aquoso.	64
Figura 4.33: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66GF30 a seco e em meio aquoso.....	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Elementos necessários para descrever o sistema tribológico (Bayer, 2002). ...	10
Tabela 2.2: Algumas propriedades características da PA6 e da PA66 (Brydson, 1995).....	12
Tabela 2.3: Valores P_v , da PA66, PA66GF30 e PA66+MoS ₂ , onde o material antagonista é o aço (Anonymous, 1995).....	16
Tabela 2.4: Comparação de algumas propriedades térmicas e mecânicas da PA66 reforçada com fibra de vidro e da PA66, adaptado de Brydson (1995).	20
Tabela 2.5: Ensaio efectuados por diversos autores com poliamidas e respectivos resultados.	21
Tabela 3.1: Propriedades físicas, químicas, mecânicas e eléctricas das poliamidas utilizadas. ⁵	28
Tabela 3.3: Parâmetros de funcionamento do tribómetro pino sobre disco da série TE67/HT.	31
Tabela 3.4: Parâmetros que se podem variar ao longo do ensaio e parâmetros obtidos ao longo do ensaio.....	31
Tabela 3.5: Condições dos ensaios efectuados.....	33
Tabela 4.1: Condições de pressão e velocidade utilizados durante os ensaios.	38
Tabela 4.2: Resultados experimentais do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio dos três materiais à pressão de contacto de 1,46MPa e à velocidade de deslizamento de 0,48 m/s.	40
Tabela 4.3: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas. ...	42
Tabela 4.4: Resultados experimentais obtidos nos ensaios efectuados com diferentes pressões de contacto à PA66, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.	44
Tabela 4.5: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes pressões de contacto para a PA66+MoS ₂ , do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio, T_m	48
Tabela 4.6: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes pressões de contacto para a PA66GF30, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.	51
Tabela 4.7: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios.....	53
Tabela 4.8: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes velocidades de deslizamento para a PA66+MoS ₂ , do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.	55

Tabela 4.9: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes velocidades de deslizamento para a PA66GF30, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima atingida durante o ensaio.	58
Tabela 4.10: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios.	60
Tabela 4.11: Resultados experimentais obtidos dos ensaios realizados à PA66+MoS ₂ a seco e em meio aquoso, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ	62
Tabela 4.12: Resultados experimentais obtidos nos ensaios a seco e em meio aquoso da PA66GF30 do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ	64

Simbologia

Δm - perda de massa
 ΔV - perda de volume
 μ - Coeficiente de atrito
 ρ - Densidade
A- Área aparente de contacto
Fa- Força de atrito
FN- Força normal
L- Distancia de deslizamento
P- Pressão de contacto
Pv- Produto da pressão aparente de contacto e velocidade de deslizamento
Ra- Rugosidade
T- Temperatura
T_f- Temperatura no final do ensaio
T_m- Temperatura máxima atingida num ensaio
v- velocidade de deslizamento
W- taxa de desgaste

Abreviaturas

HR- Humidade relativa
IEC-International Electrotechnical Commission
ISO- International Organization for Standardization
MO- Microscópio óptico
PA66- Poliamida 66
PA66GF30- Poliamida 66 com 30% de reforço de fibra de vidro
PA66+MoS₂- Poliamida 66 com bissulfureto de molibdénio
PEEK- poli-éter-éter-cetona
PTFE- Politetrafluoretileno
U HMWPE -Ultra high molecular weight polyethylene

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A tribologia é uma ciência que se foca no estudo do comportamento ao atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em contacto e movimento relativo (Stachowiak, 2005). Os problemas tribológico existem desde sempre, contudo a tribologia é uma ciência relativamente recente foi reconhecida em 1966, por uma comissão nomeada pelo governo inglês e liderada por H. Peter Jost, quando realizaram estudos sobre o impacto do atrito e desgaste em máquinas (Fahim and Davim, 2010).

Os problemas de atrito e desgaste são a maior causa de desperdício energético a nível industrial, o que os torna um problema económico. Por isso o estudo de soluções mais viáveis continua a ter grande interesse.

O comportamento tribológico de um material varia em função de vários factores, nomeadamente, a velocidade de deslizamento, a pressão de contacto, a dureza dos materiais envolvidos assim como a sua rugosidade, também depende da temperatura, da presença de lubrificantes.... Por isso quando se efectua um estudo tribológico, os resultados de atrito e desgaste são específicos, para determinada situação.

Os polímeros e os polímeros reforçados são mais atractivos em algumas aplicações que os materiais metálicos, devido à sua baixa densidade e fácil processamento (Unal et al., 2005), assim como por apresentarem baixos coeficientes de atrito e desgaste (Charles et al., 2010). O problema tribológico dos polímeros ganhou mais atenção devido à sua adequabilidade no fabrico de elementos de máquinas, na indústria alimentar e farmacêutica por não necessitarem de lubrificação. Contudo o grupo de polímeros com interesse tribológico é restrito. Deste grupo fazem parte o PTFE, os poliuretanos, UHMWPE, PEEK, poliacetais, poliimidas, expoxis e fenolicos e as poliamidas (Stachowiak, 2005).

As poliamidas são plásticos estruturais e distinguem-se de outros polímeros, por apresentarem uma boa combinação de propriedades químicas, térmicas, mecânicas e tribológicas assim como uma boa processabilidade e baixo custo (Liu et al., 2002), são um

polímero de grande interesse em engenharia que tem sido bem aceite na indústria aeronáutica, automóvel, electrónica e química (Yu et al., 2008). Estes materiais são utilizados em chumaceiras e peças de baixo atrito não lubrificadas, componentes resistentes ao impacto. Na Figura 1.1, apresentam-se alguns exemplos de aplicações das poliamidas.



Figura 1.1: Exemplos de algumas aplicações das poliamidas.¹

Na Figura 1.2, pode observar-se a evolução do número de artigos publicados que envolvem estudos tribológicos com poliamidas. Como se pode verificar, o número de artigos científicos publicados tem aumentado, o que traduz um crescente interesse deste grupo de polímeros. Como o comportamento tribológico dos polímeros não pode ser entendido de um modo generalista, o presente trabalho engloba alguns estudos efectuados com o objectivo de contribuir para o conhecimento do comportamento tribológico das poliamidas. As polímidas ensaiadas foram a poliamida 66 (PA66), a poliamida com de reforço de fibra de vidro (PA66GF30) e a poliamida com bissulfureto de molibdénio, (PA66+MoS₂).

¹<http://www.hotfrog.com.au/Companies/Dotmar-Engineering-Plastics/Ertalon-and-Nylatron-by-Dotmar-challenge-rusted-on-traditionalists-to-lift-their-game-9876>
<http://www.redwoodplastics.com/products/redco-nylon/redco-blue/>
<http://www.professionalplastics.com/NylatronMC501R6R2R9>

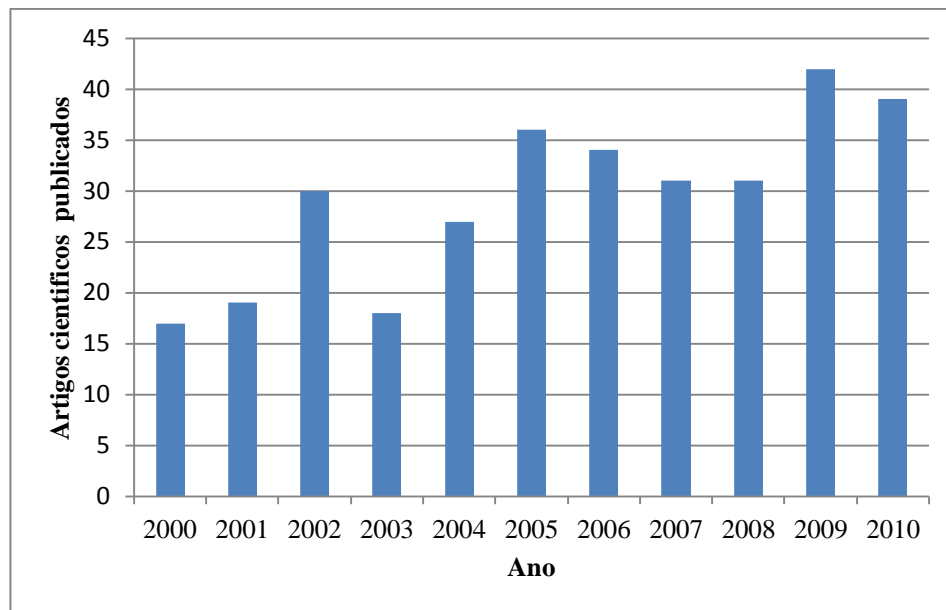


Figura 1.2: Quantidade de artigos científicos publicados entre 2000 e 2010, com estudos efectuados na área da tribologia com poliamidas.²

1.2 Organização do presente trabalho

O desenvolvimento deste trabalho de investigação foi realizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No **Capítulo 1 (Introdução)** - É feita uma breve introdução e apresentação do trabalho efectuado;
- No **Capítulo 2 (Tribologia das polimidas)**- É efectuada uma breve apresentação do conceito de tribologia. São também apresentadas algumas características relevantes das poliamidas e do seu comportamento tribológico assim como os principais factores que influenciam o seu desempenho tribológico. Também se relata a influência da adição de lubrificantes e do reforço com fibras na poliamida. Apresenta-se ainda, uma revisão do estado de arte sobre diferentes estudos tribológicos efectuados em poliamidas.

² <http://www.scopus.com/home.url>
Palavras chave: *polyamide and wear*
Data: Novembro 2011

- No **Capítulo 3 (Procedimento experimental)** - Faz-se a apresentação e caracterização dos materiais em estudo e dos equipamentos utilizados. É apresentado o procedimento experimental e as condições dos ensaios efectuados.
- No **Capítulo 4 (Resultados Obtidos e Sua Discussão)** - Ao longo deste capítulo, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos. Este capítulo está dividido em várias secções, de acordo com os objetivos propostos considerados:
 - a) Comparação do comportamento tribológico da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30;
 - b) Influência da pressão no comportamento tribológico de cada material;
 - c) Influência da velocidade no comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30;
 - d) Comparação do comportamento ao atrito e ao desgaste da PA66+MoS₂ e da PA66GF a seco e em meio aquoso;
 - e) Observação por microscópio óptico, MO das superfícies de desgaste dos discos e de algumas amostras.
- No **Capítulo 5 (Conclusões)** - São apresentadas as conclusões mais relevantes deste trabalho.

TRIBOLOGIA DAS POLIAMIDAS

2.1 Introdução

Os problemas tribológico existem desde sempre, contudo a tribologia é uma ciência relativamente recente foi reconhecida em 1966, por uma comissão nomeada pelo governo inglês e liderada por H. Peter Jost, quando realizaram estudos sobre o impacto do atrito e desgaste em máquinas (Fahim and Davim, 2010). Foca-se no estudo do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em contacto e em movimento relativo (Stachowiak, 2005).

No ambiente industrial a maior causa de desperdício de material e perda de eficiência mecânica deve-se maioritariamente ao desgaste (Unal et al., 2006). Uma das principais causas do desgaste é o atrito, que também é responsável pela dissipação de energia. Podem obter-se consideráveis poupanças, controlando o atrito. Segundo Stachowiak (2005) foram realizados diversos estudos e ensaios com o objectivo de perceber a origem do problema do atrito, de onde se concluiu que a ausência, ou a falha do filme dos materiais intervenientes no contacto estão na origem desses problemas. A formação do filme de qualquer par de materiais em contacto é um fenómeno natural que ocorre sem intervenção humana. A compreensão da formação deste filme é muito importante, uma vez que existem casos em que é possível tirar partido da sua existência, como no caso do contacto de materiais poliméricos com metais.

O desgaste e o atrito não são propriedades do material, mas a consequência de um dado sistema tribológico. Na Tabela 2.1, apresentam-se os oito elementos principais para descrever um sistema tribológico, esses elementos servem de base na análise do comportamento ao desgaste e ao atrito de um dado par de materiais (Bayer, 2002).

Tabela 2.1: Elementos necessários para descrever o sistema tribológico (Bayer, 2002).

-
- Materiais em contacto
 - Geometria dos pares de materiais
 - Topografia da superfície
 - Configuração do contacto
 - Tipo de movimento
 - Carga
 - Lubrificação
 - Condições do ambiente
-

O projecto de sistemas tribológicos de polímeros é complexo. Os valores de referência de desgaste e atrito são meramente indicativos, sendo válidos só em condições particulares. Por isso cada projecto, necessita de testes tribológicos específicos para determinar o desempenho ao desgaste e ao atrito do par de materiais envolvidos, perante condições de operação particulares. Samyn et al., (2007a), ensaiaram diversos polímeros em dois tipos de tribómetros distintos, no *block-on-ring*, (BOR) e no *cylinder-on-plate* (COP) e para as mesmas condições de ensaio obtiveram resultados diferentes. Os resultados dos testes dependem de todo o quadro tribológico por isso as condições do ensaio devem ser o mais próximas possível do ambiente da solicitação, incluindo a micro e macroestrutura do material de deslizamento, a geometria de contacto, a pressão de contacto, o tipo de escorregamento e dureza. Deve ter-se em consideração que para alguns materiais, as suas propriedades, físicas e mecânicas, podem variar ao longo do ensaio (Samyn et al., 2007b).

Na Figura 2.1 apresentam-se alguns dos parâmetros que influenciam o comportamento ao atrito e ao desgaste de um material.

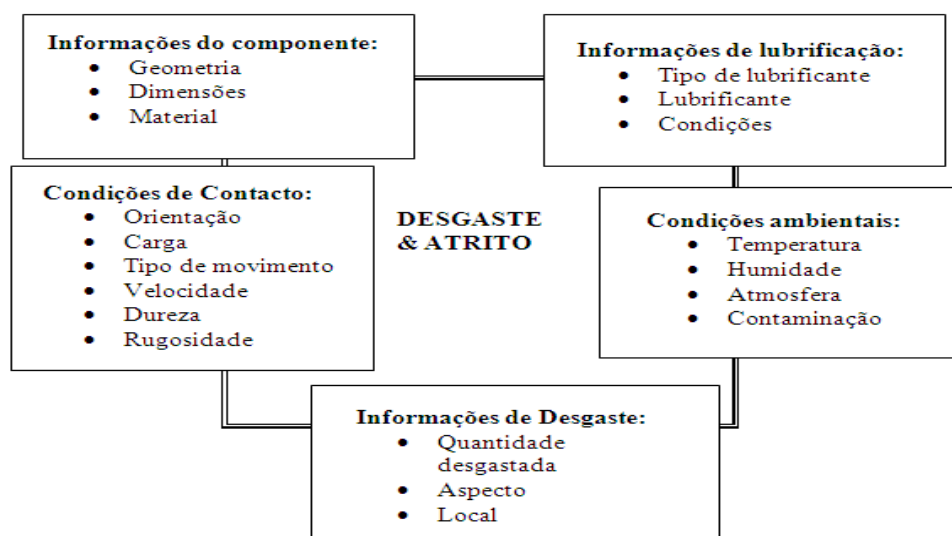


Figura 2.1: Representação esquemática de alguns dos parâmetros relevantes que condicionam o comportamento ao desgaste e ao atrito de um material.

2.2 Poliamidas

As poliamidas, vulgarmente conhecidas por nylon, são termoplásticos, semi-cristalinos, cuja cadeia principal incorpora um grupo amina e um grupo ácido. Existe uma grande variedade de poliamidas, com cadeias de repetição diferentes mas todas têm em comum a ligação amina (Smith, 1998). Para as distinguir, utiliza-se um número que significa o número de átomos de carbono presentes em cada grupo amina e ácido (Kurtz, 2006). As poliamidas são plásticos estruturais e distinguem-se de outros polímeros, por apresentarem uma boa combinação de propriedades químicas, térmicas, mecânicas e tribológicas assim como uma boa processabilidade e baixo custo (Liu et al., 2002). A elevada resistência mecânica e boa resistência química, devem-se em parte às ligações de hidrogénio presentes entre cadeias moleculares uma vez que a ligação amina torna possível uma ligação-NHO (Ácido) do tipo ponte de hidrogénio, entre as cadeias. Na Figura 2.2, encontra-se a estrutura química de um monómero de poliamida 66, PA66 e poliamida 6, PA6. A flexibilidade das cadeias de carbono contribui para a elevada lubrificação, baixo atrito e boa resistência à abrasão. No entanto a polaridade e as ligações de hidrogénio do grupo amina provocam uma elevada absorção de água, (Smith, 1998) o que afecta consideravelmente o seu comportamento mecânico, principalmente a sua rigidez (Miri et al., 2009).

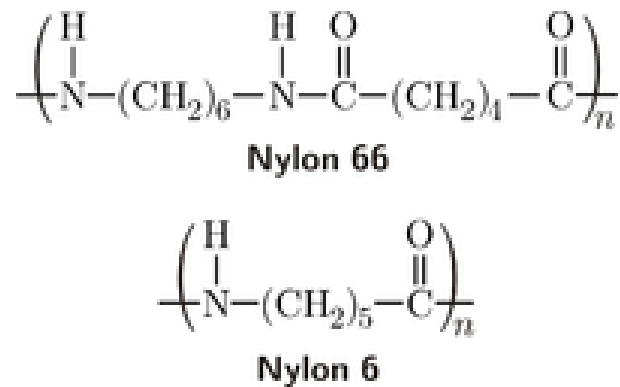


Figura 2.2: Estrutura química de um monómero de PA66 e PA6

Os dois principais grupos de poliamidas são as poliamida 6, (PA6), e a poliamida 66, (PA66) (Kurtz, 2006). Contudo apesar da PA66 ter um custo superior, é mais utilizada que a PA6, por ter uma melhor estabilidade dimensional e melhor desempenho químico e térmico (Brandrup, 1999). Na Tabela 2.2, encontram-se algumas propriedades características da PA6 e da PA66.

Tabela 2.2: Algumas propriedades características da PA6 e da PA66 (Brydson, 1995).

Material	Densidade [g/cm ³]	Resistência à tracção [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]	Temperatura de fusão °C	Coefficiente de expansão linear [cm/(cm.°C)]
PA6	1,13	76	2800	215	$9,5 \times 10^{-5}$
PA66	1,14	80	3000	264	$9,9 \times 10^{-5}$

As poliamidas são um polímero de grande interesse em engenharia que tem sido bem aceite na indústria aeronáutica, automóvel, electrónica e química (Yu et al., 2008). Estes materiais são utilizados em chumaceiras e peças de baixo atrito não lubrificadas, componentes resistentes ao impacto, velocímetros, mecanismos de limpa pára-brisas, entre outros. A poliamida reforçada com fibra de vidro é utilizada, por exemplo, em pás de ventiladores de motores, travões, reservatórios de óleo de motores, revestimento de válvulas e caixas de colunas de direcção de motores. Em aplicações electrónicas a poliamida faz parte de dispositivos de ligação, fichas, isolamento de fios de ligação, suportes de antenas e terminais (Smith, 1998). Na Figura 2.3 apresentam-se alguns exemplos de aplicações das poliamidas.

Figura 2.3: Exemplos de algumas aplicações das poliamidas.³

³ Adaptado de :

<http://www.barkstonltd.co.uk/plastic-supplies/general-engineering/nylon-ertalon-nylatron>

<http://www.hellotrader.com/dotmar-universal/glass-filled-nylon.html>

<http://www.plasticsintl.com/nylon.htm>

2.3 Comportamento tribológico das poliamidas

Os polímeros e os polímeros reforçados são mais atractivos em algumas aplicações que os materiais metálicos, devido à sua baixa densidade e fácil processamento (Unal et al., 2005), assim como apresentarem baixos coeficientes de atrito e desgaste (Charles et al., 2010). O problema tribológico dos polímeros ganhou mais atenção devido à sua adequabilidade no fabrico de elementos de máquinas, na indústria alimentar e farmacêutica por não necessitarem de lubrificação. Nestes casos os polímeros são muito utilizados em componentes de engenharia, como rodas dentadas, cames e rolamentos, onde as suas propriedades de auto-lubrificação são exploradas para evitar o uso de óleos e massas consistentes e assim eliminar o problema da contaminação (Unal and Mimaroglu, 2003, Unal et al., 2004). Contudo o grupo de polímeros com interesse tribológico é restrito, deste grupo fazem parte o PTFE, os poliuretanos, UHMWPE, PEEK, poliacetais, poliimidas, epoxis e fenolicos e as poliamidas (Stachowiak, 2005).

As poliamidas têm um grande volume comercial em plásticos de engenharia (Chen et al., 2005). São vastamente utilizadas em situações onde é exigida grande resistência ao desgaste e moderados coeficientes de atrito, como é o caso de componentes de transmissão de máquinas (Rajesh et al., 2002).

Um dos factores muito importantes no estudo de um sistema tribológico polimérico é o desgaste. Dependendo do sistema, quando o material utilizado é polimérico, os tipos de desgaste mais frequentes são o desgaste adesivo e o desgaste abrasivo. O processo de desgaste é controlado pela transferência de material, fenómeno bastante complexo (Rymuza, 2007). O contacto entre corpos, dá-se entre pontos isolados, a chamada área real, esses pontos permitem que ocorra adesão. Quando duas superfícies se movem, uma relativamente à outra, essas microsoldaduras são quebradas e novas uniões são formadas. Quando o contacto é polímero/metal, o mecanismo de adesão pode evoluir para um mecanismo de tribofilme. Este tipo de mecanismo está associado ao desgaste proveniente da formação de uma camada de material, na superfície de contacto ou nos materiais em contacto. Quando esta camada de material se forma no material da contraface, designa-se por filme. A formação desta película é influenciada pelos materiais envolventes no contacto, mas também pelo tipo de movimento, carga aplicada, velocidade, lubrificação e rugosidade das superfícies (Bayer, 2002). Relativamente ao desgaste abrasivo pode ocorrer, quando um dos materiais envolvidos no contacto tem uma dureza bastante superior ao outro. Quando existem materiais poliméricos envolvidos no contacto, por vezes o seu reforço funciona como terceiro corpo no contacto, provocando abrasão (Unal et al., 2005).

Outro factor muito importante é o atrito. O atrito em polímeros pode ser provocado por dois mecanismos, a adesão e a deformação (Unal and Mimaroglu, 2003). Os mecanismos de deformação englobam dissipação de energia na área de contacto, segundo

Samyn et al (2007a), a componente de adesão depende do módulo de Young da poliamida, uma vez que está relacionada com a flexibilidade da cadeia polimérica.

A escolha dos materiais envolventes no deslizamento é muito importante, quando um dos materiais envolvidos no deslizamento é polimérico, o aço é uma boa escolha para material da contraface, por permitir uma boa dissipação do calor (Hooke et al., 1996). Segundo Chen (2003) a poliamida a deslizar sobre o aço proporciona relativamente baixos coeficientes de atrito e elevada resistência ao desgaste. Este comportamento deve-se à afinidade que a poliamida tem em formar o filme contra superfícies mais duras. A formação deste filme influencia fortemente o seu comportamento tribológico (Yu et al., 2008).

2.3.1 Parâmetros que influenciam o comportamento tribológico das poliamidas.

O comportamento tribológico de um dado par de materiais é influenciado por vários factores, como já vimos anteriormente. O coeficiente de atrito das poliamidas é bastante influenciado por factores como a carga, a velocidade de deslizamento, a temperatura (Wang et al., 2008), as propriedades do material, a humidade e a presença de lubrificação (Habib S, 2007). Na Figura 2.4 pode observar-se um resumo de todos os parâmetros que influenciam o comportamento tribológico das poliamidas.

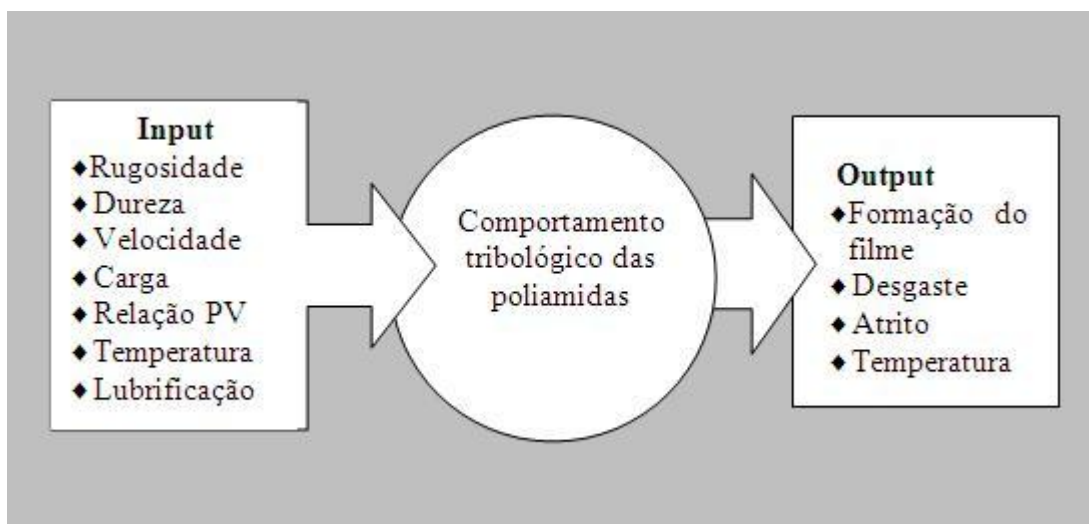


Figura 2.4: Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento tribológico das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico.

2.3.1.1 Rugosidade e Dureza

A rugosidade do material antagonista é um dos mais complexos parâmetros no comportamento ao desgaste dos polímeros. Segundo Rymuza (2007), coeficiente de atrito

é fortemente influenciado pela rugosidade do material antagonista. Para rugosidades baixas o coeficiente de atrito é mais elevado do que para rugosidades mais altas, devido à adesão do polímero, contudo esta tendência inverte-se a partir de um certo valor de rugosidade. Relativamente ao valor da rugosidade, também é mencionado por Unal (2005), que esta deve ser a menor possível, para reduzir o efeito de abrasão no polímero.

No estudo de materiais poliméricos é recomendado que o material antagonista seja bastante mais duro (Stachowiak, 2005).

2.3.1.2 Velocidade de deslizamento

O efeito da velocidade de deslizamento no desgaste de polímeros sob escorregamento a seco depende de vários factores, entre eles a rugosidade do material antagonista. Nem sempre o desgaste aumenta com o aumento da velocidade, uma vez que depende do sistema tribológico (Franklin, 2001). Unal et al.(2004) realizaram ensaios com a PA66, onde variaram a velocidade e verificaram que esta influencia fortemente o comportamento tribológico do material. Feyzullahoglu and Saffak (2008), realizaram ensaios da PA6, com diferentes velocidades e concluíram que o aumento da velocidade, provoca um aumento da força de atrito.

2.3.1.3 Carga

Relativamente à carga aplicada, Rajesh et al (2002), Unal et al (2006), Unal et al (2004), Yu et al (2008), Unal and Mimaroglu (2003), perante diferentes condições de ensaios a seco, concluíram que o coeficiente de atrito nas poliamidas diminui perante um aumento da carga aplicada e que a resistência ao desgaste aumentou perante as mesmas condições. Meng et al (2009) concluiu que o coeficiente de atrito e o coeficiente de desgaste da poliamida aumentavam perante um aumento da carga aplicada. Segundo este autor, o aumento da carga provoca um aumento do calor no contacto, o que acarreta dois efeitos contraditórios no comportamento ao atrito, por um lado a tensão de corte diminui, o que provoca uma diminuição do coeficiente de atrito, por outro lado o modulo de rigidez diminui com a temperatura, o que provoca um aumento da área real de contacto e consequentemente aumenta o coeficiente de atrito. Xing et al.(2009), testou a poliamida reforçada com diferentes cargas e concluiu que o coeficiente de atrito aumenta perante um aumento da carga e que a resistência ao desgaste diminuiu perante as mesmas condições. Segundo este autor, o aumento da carga provoca um aumento do calor gerado por atrito, o que compromete a viscoelasticidade do material e consequentemente resistência das ligações moleculares diminui. Este fenómeno permite que material da matriz seja transferido para a contraface, o que provoca que a fibra tenha um efeito de abrasão e consequentemente o coeficiente de atrito aumente.

2.3.1.4 Relação Pv

A relação Pv é um parâmetro empírico cujo limite, transmite os máximos de pressão e velocidade aos quais ocorre desgaste rápido e sobreaquecimento do polímero. Para valores abaixo do limite, o desgaste é mais lento e no processo de fractura, as fendas vão aumentando o que provoca libertação de pequenas partículas de material (Stachowiak, 2005).

Para Van De Velde and De Baets (1997) os valores de Pv para as poliamidas, variam de 10^{-4} a 0.7 MPa.m.s^{-1} com os limites de pressão de 7×10^{-3} a 10 MPa . Contudo no livro *Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers* (Anonymous, 1995), foram encontrados valores mais específicos da relação Pv, Tabela 2.3, da PA66, PA66GF30 e da PA66+MoS₂, onde o material da contraface é o aço.

Segundo Rymuza (2007) a resistência ao desgaste em materiais poliméricos é maior para relações de Pv maiores.

Tabela 2.3: Valores Pv, da PA66, PA66GF30 e PA66+MoS₂, onde o material antagonista é o aço (Anonymous, 1995).

Material	Velocidade [m/s]	Pv [MPa.m/s]
PA66	0,05	0,088
	0,5	0,088
	5,6	0,875
PA66 GF30	0,05	0,35
	0,5	0,26
	5,6	0,7
PA66+MoS ₂	0,5	0,245

2.3.1.5 Temperatura

Nos polímeros o efeito da temperatura é muito importante e depende das condições do ensaio e do calor gerado por atrito na interface.

Segundo Samyn et al (2007a) a dissipação de energia por atrito na zona de contacto provoca um aumento da temperatura. O calor gerado por atrito é um factor muito importante, uma vez que interfere nas propriedades mecânicas e estabilidade do polímero.

De acordo com Chang et al (2006), o aumento da temperatura e do atrito estão interligados, e o seu comportamento ao longo do ensaio é idêntico. A temperatura na zona de contacto aumenta na mesma proporção que o atrito. Estes dois parâmetros têm um aumento acentuado no estado inicial de desgaste e são consequência do aumento da área de contacto e do aquecimento por atrito.

A poliamida tem uma temperatura de transição vítrea e condutividade térmica baixas. Estes dois parâmetros com o calor proveniente da fricção conduzem rapidamente à temperatura de fusão. Quando o polímero entra em fusão o seu comportamento ao desgaste e ao atrito é drasticamente alterado. O coeficiente de atrito tende a diminuir e a taxa de desgaste tende a aumentar com o aumento da temperatura (Stachowiak, 2005).

2.3.1.6 Lubrificação

A lubrificação consiste na adição de um material para reduzir o desgaste ou o atrito entre as superfícies em contacto. Geralmente a lubrificação reduz o desgaste e o atrito, contudo o seu efeito depende do sistema tribológico. O lubrificante pode ser seco, pastoso ou líquido. A lubrificação a seco é feita por sólidos, como é o caso do PTFE, da grafite e do MoS₂ (bissulfureto de molibdénio), a lubrificação pode ser feita pela adição de partículas ou de mantas de diversos tipos (Bayer, 2002).

A adição de MoS₂ (bissulfureto de molibdénio) na PA66, origina um polímero com maior estabilidade dimensional, maior rigidez e dureza, consequentemente reduz ligeiramente a sua resistência ao impacto. A dispersão do bissulfureto molibdénio na estrutura molecular resulta num maior grau de cristalização, melhorando as propriedades de deslizamento e desgaste. Por outro lado perante uma situação de desgaste o MoS₂ adicionado à poliamida tende a oxidar, o que não permite que se forme o filme, e que acarreta consequências no seu comportamento ao atrito e desgaste (Stachowiak, 2005). Contudo o seu comportamento está condicionado pela percentagem de MoS₂ adicionado à poliamida, como verificaram Bermúdez et al.(2001). Existe uma forte tendência em adicionar MoS₂ à poliamida, contudo esta junção pode não ser muito vantajosa, como relatou Zhang (1998), uma vez que acarreta poucas vantagens na melhoria do atrito e pode provocar um aumento do desgaste. Wang et al (2003), concluíram que a o MoS₂, pode provocar um aumento do desgaste e uma diminuição do atrito, dependendo das condições de ensaio, o seu comportamento reflecte-se na estabilidade e espessura do filme gerado.

Devido à polaridade da poliamida, os ácidos gordos, como o ácido caprílico, o palmítico e o esteracido, são bons lubrificantes, reduzindo o seu coeficiente de atrito de 0.4 para 0.09 (Stachowiak, 2005). Quando o lubrificante utilizado é água, a afinidade das moléculas do polímero e o aço são reduzidas. A água tem o poder de refrigerar e limpar a superfície de contacto entre o polímero e o aço, por isso ao contrário do escorregamento a seco, não se consegue formar o filme e o escorregamento ocorre entre o polímero e o aço. Por outro lado a água actua como lubrificante, formando um filme hidrodinâmico na área de contacto durante o escorregamento, o que faz com que o coeficiente de atrito seja inferior ao de um escorregamento a seco. Em meio aquoso, o facto de o polímero absorver água, provoca plastificação da superfície (Srinath and Gnanamoorthy, 2007), e

consequentemente a resistência e a dureza da poliamida ficam comprometidas (Meng et al., 2009), o que penaliza o seu comportamento ao desgaste (Yu et al., 2008).

2.3.1.7 Formação do filme

O comportamento tribológico das poliamidas está condicionado pela natureza, espessura e estabilidade do filme assim como pelas propriedades do material da contraface (Chen et al., 2003). Segundo Samyn et al (2007a) a formação do filme, depende da adesão, do calor gerado por atrito e da compactação das partículas no local de escorregamento, estes parâmetros são influenciados pela carga aplicada, temperatura, velocidade de escorregamento e rugosidade do material antagonista (Rymuza, 2007).

Segundo Yu et al (2008) um filme contínuo e uniforme pode diminuir o coeficiente de atrito e aumentar a resistência ao desgaste. Num escorregamento a seco, quando a carga aplicada é baixa, a pressão entre a amostra e o aço assim como o calor proveniente do atrito entre as superfícies também são baixos, estes factores não são propícios à formação do filme. Ao aumentar a carga aplicada, aumenta a pressão entre a amostra e a contraface e consequentemente aumenta o calor gerado por atrito o que favorece a ocorrência de reacções triboquímicas. Com este tipo de reacções tem-se a formação do filme, uma vez que induzem na adesão do polímero ao aço (Chen et al., 2005). Contudo esta película inicial não é contínua o que faz aumentar o coeficiente de atrito, como foi comprovado por Liu (2002). Quando se aumenta a carga aplicada para valores superiores aos do início da formação do filme, aumenta o calor gerado por atrito e são depositadas mais partículas de material no aço o que faz com que o filme seja formado por completo. Após a formação do filme passa a existir contacto polímero/polímero o que provoca uma diminuição no coeficiente de atrito (Yu et al., 2008).

2.4 Compósitos de poliamida

É raro utilizarem-se os polímeros no seu estado puro, uma vez que durante o seu processo de fabrico são por vezes utilizados plasticizantes e colorantes, o que influenciam o seu comportamento ao atrito e ao desgaste.

Os materiais termoplásticos, quando comparados com os materiais metálicos, apresentam algumas desvantagens, por apresentarem baixas temperaturas de serviço, baixa rigidez e resistência a tracção, assim como terem instabilidade dimensional devido aos seus elevados coeficientes de expansão e à capacidade de absorção de água. Para colmatar estas desvantagens, surgiram os polímeros reforçados com fibras (Brydson, 1995), estes materiais podem ser utilizados em ambientes com condições adversas, como em meios aquosos, corrosivos e químicos (Srinath and Gnanamoorthy, 2007).

Os polímeros compósitos têm sido aplicados em diversos produtos (Gustafson and Waas, 2006), nomeadamente em elementos de máquinas (engrenagens, rolamentos), por não necessitarem de lubrificação (Srinath and Gnanamoorthy, 2007). O principal papel dos polímeros compósitos é aumentar a resistência mecânica este objectivo tem consequências no comportamento tribológico do material. Os polímeros compósitos são obtidos pela adição de reforço e agentes lubrificantes. Na Tabela 2.4 estão indicadas algumas propriedades mecânicas e térmicas de uma poliamida e da mesma com reforço de fibra de vidro.

O reforço de polímeros com fibras é muito utilizado. Existem duas formas de reforçar polímeros, com fibras curtas de orientação aleatória ou com fios unidireccionais. Os polímeros reforçados são até quatro vezes mais resistentes que os não reforçados, os reforços podem ser de fibra de vidro, carbono, aramida, polimérica, metálica, etc... Contudo o comportamento varia em função da percentagem de reforço, geometria e orientação (Kukureka et al., 1999).

Quando os polímeros são reforçados com fibras de vidro, carbono ou aramida, e a contraface de deslizamento é o aço, o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste são favorecidos (Xing et al., 2009).

Segundo Kukureka (1999), há uma forte tendência para reforçar os polímeros com fibras curtas para aumentar a rigidez e a capacidade de suportar cargas. Estes materiais têm sido bem sucedidos em solicitações curtas, mas são menos eficientes em solicitações prolongadas, contudo até uma vida de 10^7 ciclos os reforços com fibras de vidro curtas são bons. Este tipo de reforço, é eficaz na redução do desgaste, devido à forte adesão entre a fibra e matriz, também proporciona maiores velocidades de utilização. O maior problema é a ocorrência de fractura entre as fibras e a matriz, o que faz com que o desgaste dependa mais da fractura do que das propriedades mecânicas do material. Contudo este tipo de reforço, oferece boa resistência ao desgaste perante superfícies lisas, onde os mecanismos de adesão e fadiga são prevalentes, em contrapartida perante condições abrasivas ou erosivas apresentam uma resistência ao desgaste inferior aos polímeros não reforçados.

Os compósitos com fibras unidireccionais são críticos para a tribologia dos polímeros. Existem três principais tipos de orientação das fibras relativamente ao plano de escorregamento, a orientação paralela, anti-paralela e a normal, o comportamento ao desgaste das fibras nas diferentes orientações é similar mas não igual. Com fibras paralelas e anti-paralelas ao escorregamento, as partículas soltas pelo material podem variar desde partículas muito pequeninas até segmentos de fibra completos. Em contrapartida as partículas da matriz tendem a ser uniformes e finas, o que favorece a formação do filme e consequentemente, faz reduzir o coeficiente de atrito. Quando a solicitação é normal à orientação das fibras, o seu comportamento é bastante diferente, uma vez que as fibras desgastadas continuam ligadas à matriz. Com o decorrer da solicitação as fibras são expostas repetidamente à flexão, o que provoca danos como fractura, propagação de fendas

e fragmentação de fibras no contacto, que são transformadas em partículas de desgaste, os coeficientes de desgaste são relativamente baixos, contudo podem aumentar repentinamente (Stachowiak, 2005).

Tabela 2.4: Comparação de algumas propriedades térmicas e mecânicas da PA66 reforçada com fibra de vidro e da PA66, adaptado de Brydson (1995).

Propriedades	Reforçado	Não reforçado
Densidade	1,38	1,14
Resistência à tracção [MPa]	159	79
Módulo de elasticidade [MPa]	8000	3000
Absorção de água à saturação	5,6	8,9
Temperatura de deformação sobre carga 1.8 [MPa]	245	75
Coefficiente de expansão linear [cm/cm°C]	$2,8 \times 10^{-5}$	$9,9 \times 10^{-5}$

2.5 Síntese

As poliamidas são materiais de grande interesse tribológico e industrial devido a todas as suas características. Ao longo dos anos foram realizados diversos trabalhos na área da tribologia com este polímero, onde foram avaliados os comportamentos ao desgaste e ao atrito perante diversas condições de ensaio. A maior parte dos estudos foca-se na influência da carga aplicada e no estudo concreto da PA6 e PA66. Na Tabela 2.5, estão alguns resultados do comportamento tribológico das poliamidas, encontrados por diversos autores. Devido à complexidade do comportamento deste tipo de material e à sua forte procura no mercado, torna-se necessário fazer mais estudos tribológicos, para melhor compreender o seu desempenho perante diferentes situações. Como existem poucos estudos sobre a PA66+MoS₂, é justificativo investigar mais este tipo de material. Relativamente à poliamida com reforço de fibra de vidro apesar de não ser um material tão recente, continua a justificar-se o seu estudo tribológico, uma vez que os resultados apresentados por vezes tornam-se algo contraditórios.

Tabela 2.5: Ensaios efectuados por diversos autores com poliamidas e respectivos resultados.

Condições de ensaio								Resultados		Autor
Material da amostra	Dimensões da amostra	Tribómetro	Contraface de deslizamento	Distância percorrida [m]	Carga normal [N]	Velocidade deslizamento [m/s]	Lubrificação	K [mm³/(N.m)]	μ	
PA66	10mmX10mmX4mm	Pino sobre disco	Lixas abrasivas com tamanho de grão 80	3,26	4	0,05	Não	6,12 x10 ⁻⁵	-	(Rajesh et al., 2002)
					6			5,88 x10 ⁻⁵	-	
					8			5,76 x10 ⁻⁵	-	
					10			5,65 x10 ⁻⁵	-	
PA66GF30	50 mm de comprimento / 6 mm diâmetro	Pino sobre disco	Poliéster+15% GFR (BMC)	1000	20	0,5	Não	9,60 x10 ⁻⁵	0,7	(Unal et al., 2006)
					40			1,29 x10 ⁻⁴	0,52	
					60			2,32 x10 ⁻⁴	0,43	
PA66	50 mm de comprimento / 6 mm diâmetro	Pino sobre disco	Aço AISI D2	1000	10	1	Não	8,94 x10 ⁻⁶	0,52	(Unal et al., 2004)
					20			8,94 x10 ⁻⁶	0,42	
					30			8,94 x10 ⁻⁶	0,37	
					10	0,5	Não	8,94 x10 ⁻⁶	0,32	
						1		8,94 x10 ⁻⁶	0,52	
						2		2,68x10 ⁻⁵	0,5	
PA66	10 mmX10mmX14mm	Block-on-Ring (BOR)	Aço GCr15	3024	49	0,42	Não	-	0,602	(Yu et al., 2008)
					98			-	0,806	
					147			-	0,708	
					196			-	0,608	
					49		água	-	0,205	
					98			-	0,203	
					147			-	0,205	
					196			-	0,207	
PA6	50 mm de comprimento / 6 mm diâmetro	Pino sobre disco	Aço	3168	20	0,88	Não	4,42 x10 ⁻⁶	0,09	(Unal and Mimaro glu, 2003)
					30			4,42 x10 ⁻⁶	0,11	
					40			4,42 x10 ⁻⁶	0,12	

PA66	50 mm de comprimento / 6 mm diâmetro	Pino sobre disco	Lixas abrasivas de 150	50	10	1	Não	$1,28 \times 10^{-4}$	-	(Unal et al., 2005)
				100				$1,00 \times 10^{-4}$	-	
				150				$1,00 \times 10^{-4}$	-	
				200				$9,58 \times 10^{-5}$	-	
			Lixas abrasivas de 360	50				$4,00 \times 10^{-5}$	-	
				100				$2,23 \times 10^{-5}$	-	
				150				$2,10 \times 10^{-5}$	-	
				200				$1,71 \times 10^{-5}$	-	
			Lixas abrasivas de 800	50				$2,91 \times 10^{-5}$	-	
				100				$2,18 \times 10^{-5}$	-	
				150				$2,00 \times 10^{-5}$	-	
				200				$1,91 \times 10^{-5}$	-	
			Lixas abrasivas de 1200	50				$5,71 \times 10^{-6}$	-	
				100				$5,71 \times 10^{-6}$	-	
				150				$5,24 \times 10^{-6}$	-	
				200				$5,24 \times 10^{-6}$	-	
PA66GF30 +2,5% MoS ₂		Block-on-Ring (BOR)	Aço	3024	0,42	Não	-	0,12	(Xing et al., 2009)	
							100	-		0,20
							150	-		0,35
							200	$25,32 \times 10^{-6}$		0,4
							250	-		0,62
PA66GF30 +2,5% PTFE							50	-		0,10
							100	-		0,20
							150	-		0,27
							200	$13,45 \times 10^{-6}$		0,34
							250	-		0,50
PA66GF35 +2,5% MoS ₂ + 2,5%PTFE							50	-		0,04
							100	-		0,15
							150	-		0,34
							200	$5,15 \times 10^{-6}$		0,36
							250	-		0,45
PA66							200	$27,88 \times 10^{-6}$		0,73

Nylon 1010		Block-on-Ring (BOR)	Aço AISI 1045	3024	100	0,42	Não	$11,7 \times 10^{-6}$	0,64	(Wang et al., 2003)
Nylon 1010+10% MoS ₂					200			78×10^{-6}	0,55	
					100			$14,04 \times 10^{-6}$	0,44	
					200			116×10^{-6}	0,60	
PA6+1% MoS ₂	Raio-0,34 [mm]	Pino sobre disco	Aço AISI 52100	1000	7	0,1	Não	-	0,26	(Bermúdez et al., 2001)
PA6+5% MoS ₂								-	0,28	
PA6	12,8 mm de comprimento / 4,8 mm diâmetro	Pino sobre disco	Aço AISI 314	7200	20	1,0	Não	5×10^{-6}	0,36	(Meng et al., 2009)
					30			10×10^{-6}	0,45	
					40			18×10^{-6}	0,60	
					50			27×10^{-6}	0,68	
					20		água	20×10^{-6}	0,20	
					30			25×10^{-6}	0,16	
					40			40×10^{-6}	0,10	
					50			55×10^{-6}	0,07	
PA6	20 mm de comprimento / 7,8 mm diâmetro	Pino sobre disco	Aço AISI 314	6000	30	0,4	Não	20×10^{-6}	0,30	(Srinath and Gnana moorthy, 2007)
					40			23×10^{-6}	0,34	
					50			40×10^{-6}	0,43	
					60			47×10^{-6}	0,54	
					30		agua	5×10^{-6}	0,45	
					40			10×10^{-6}	0,28	
					50			26×10^{-6}	0,21	
					60			28×10^{-6}	0,18	

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais ensaiados

Os materiais ensaiados, foram a poliamida 66 (PA66), a poliamida 66 reforçada com 30% de fibra de vidro (PA66GF30) e a poliamida 66 com adição de bissulfureto de molibdénio MoS_2 (PA66+ MoS_2), utilizando como material antagonista o Aço CK45.

3.1.1 Poliamida 66 (PA66)

A poliamida 66, tem boa resistência química, apresenta um bom comportamento ao desgaste assim como maior rigidez que a poliamida 6, tem uma boa tenacidade mesmo perante humidade (Laurence W, 2008). Confere uma boa resistência à flexão, contudo a sua resistência ao impacto e capacidade de amortecimento mecânico são menores. Este tipo de material pode ser aplicado em diversos componentes de engenharia, como rodas dentadas, casquilhos, rolos, rodas, peças de desgaste, separadores, suportes, peças estruturais.⁴

3.1.2 Poliamida 66 reforçada com 30% de fibra de vidro (PA66GF30)

A poliamida reforçada com 30% de fibra de vidro é estabilizada ao calor, oferece maior resistência, rigidez e estabilidade dimensional, mantendo a resistência ao desgaste excelente, quando comparada com a poliamida 66. Este material é fortemente aplicado em casquilhos, rodas dentadas, isoladores eléctricos, fieiras, peças estruturais e protótipos.⁴

⁴ <http://www.lanema.pt/>

3.1.3 Poliamida com adição de MoS₂

Por vezes há necessidade de adicionar lubrificantes sólidos aos polímeros para melhorar as suas características de escorregamento. Este tipo de lubrificação trás grandes vantagens em polímeros que possuem uma lubrificação moderada, como é o caso das poliamidas (Stachowiak, 2005). Este polímero é utilizado em casquilhos e réguas de deslizamento.⁵

3.1.4 Propriedades dos materiais utilizados

Na Tabela 3.1, podem observar-se as propriedades, físicas, térmicas, mecânicas e eléctricas da PA66, PA66GF30 e da PA66+MoS₂.

Tabela 3.1: Propriedades físicas, químicas, mecânicas e eléctricas das poliamidas utilizadas.⁵

Propriedades	Norma	PA66	PA66-GF30	PA66+ MoS ₂
Físicas				
Densidade [g/cm ³]	ISO1183	1,14	1,29	1,15
Taxa de Absorção de água:				
-Após 24/96h imerso em água a 23° C[%]	ISO 62	0,6/1,07	0,39/0,74	0,68/1,25
-Até à saturação a 23°C/50 %RH [%]		2,4	1,7	2,3
-Até à saturação a 23°C[%]		8	5,5	7,8
Térmicas				
Temperatura de fusão [°C]		255	255	255
Condutividade térmica a 23°C [w/(K.m)]		0,28	0,30	0,29
Coefficiente de expansão térmica linear entre 23 e 60 °C [m/(m.K)]		80x10 ⁻⁶	50x10 ⁻⁶	80x10 ⁻⁶
Coefficiente de expansão térmica linear entre 23 e 100 °C [m/(m.K)]		95x10 ⁻⁶	60x10 ⁻⁶	90x10 ⁻⁶

⁵ <http://www.lanema.pt/>

Temperatura máxima de deformação sob carga a 23°C 50% RH: -método A: 1.8 MPa [°C]	ISO 75	85		150		85	
Temperatura máxima de serviço: -Períodos curtos [°C] -Em contínuo:5000/2000 h [°C]		180 95/80		240 110/120		180 80/95	
Temperatura mínima de serviço [°C]		-30		-20		-20	
Inflamabilidade: “índice de oxigénio”	ISO 4589	26		-		26	
Mecânicas a 23°C		Seco	50%RH	Seco	50%RH	Seco	50%RH
Ensaio à tracção: -Resistência à tracção [MPa] -Deformação à rotura [%] -Modulo de elasticidade [MPa]	ISO 527 ISO 527 ISO 527	90/- >40 3250	55/- >100 1650	-/100 5 5900	-/75 12 3200	92/- >50 3500	55/- 20 1675
Ensaio de compressão: -Resistência à compressão com 1/2/5% de deformação nominal [MPa]	ISO 604	25/49/92		28/55/90		25/49/92	
Flexibilidade: Tensão para produzir 1% de deformação em 1000h.	ISO 899	20	8	26	18	21	9
Ensaio de Impacto IZOD com entalhe [KJ/m²]	ISO 180/2A	4.5	11	6	11	4	4
Identificação da dureza por esfera de aço [N/mm²]	ISO 2039-1	160		165		165	
Dureza de Rockwell	ISO 2039-2	M88		M76		M88	
Eléctricas a 23°C		Seco	50%RH	Seco	50%RH	Seco	50%RH
Rigidez dielétrica [Kv/mm]	IEC 243	27	18	30	20	26	17

Resistividade volumétrica [Ohm.cm]	IEC 93	$>10^{14}$	$>10^{12}$	$>10^{14}$	$>10^{13}$	$>10^{14}$	$>10^{12}$
Resistividade superficial [Ohm]	IEC 93	$>10^{13}$	$>10^{12}$	$>10^{13}$	$>10^{12}$	$>10^{13}$	$>10^{12}$
Permeabilidade relativa: -a 100 Hz -a 1MHz	IEC 250	3,8 3,3	7,4 3,8	3,9 3,6	6,9 3,9	3,8 3,3	7,4 3,8
Factor de dissipação dieléctrica: -a 100 Hz -a 1Hz	IEC 250	0,013 0,020	0,13 0,06	0,012 0,014	0,19 0,04	0,013 0,020	0,13 0,06

3.1.5 Material antagonista

O material utilizado na contraface foi o aço CK45K-DIN com a seguinte composição 0,45% C, 0,25Si e 0,65Mn e uma dureza média de 220HB.⁶

3.2 Tribómetro pino sobre disco

O tribómetro de pino sobre disco, Figura 3.1, é um equipamento que permite ensaiar diferentes pares de materiais, controlando a carga, a velocidade de deslizamento e a temperatura. Com o propósito de obter resposta quanto ao comportamento do desgaste e do atrito dos materiais.

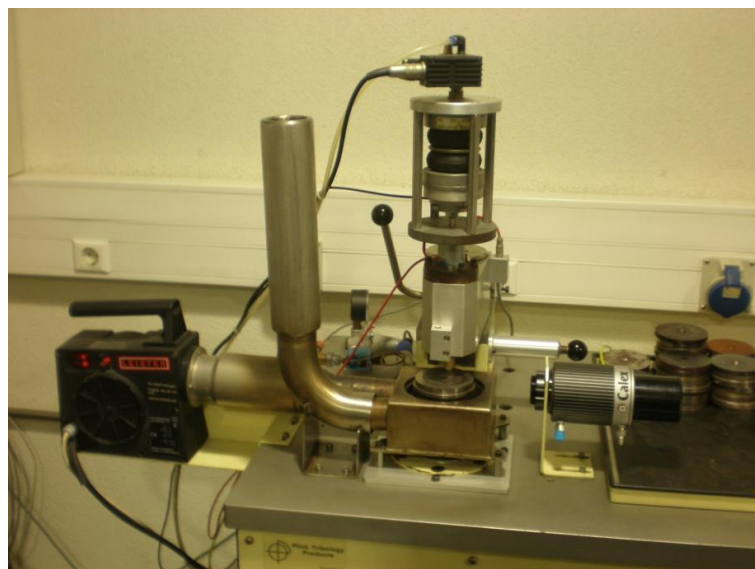


Figura 3.1: Tribómetro de pino sobre disco da phoenix-tribology⁷ (série TE67/HT).

⁶ <http://www.ramada.pt/>

⁷ <http://www.phoenix-tribology.com/>

O tribómetro utilizado nos ensaios foi projectado e fabricado pela *phoenix-tribology*. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, encontram-se os seus parâmetros de funcionamento. Este equipamento tem uma base para fixação dos discos e uma bucha de aperto dos pinos, um sistema de carga pneumático, que pode ser substituído por um sistema de pesos mortos. O accionamento da máquina é feito através de um computador com recurso a *software* apropriado, (o *compend2000 V2.1*). No anexo A, apresenta-se o manual simplificado deste equipamento.

Tabela 3.2 Parâmetros de funcionamento do tribómetro pino sobre disco da série TE67/HT.

Parâmetros	Limites de funcionamento
Velocidade angular	- 20 até 1000 rpm
Carga aplicada	-5 a 100 N (pesos mortos) -50 até 1000N (carga pneumática)
Temperatura	-em testes com lubrificação, da temperatura ambiente até 200°C. -em testes a seco, da temperatura ambiente até 400°C. -Utilizando o sistema de aquecimento por gás, desde a temperatura ambiente até 750°C.

O *software* de aquisição de dados tem uma interface interactiva que permite para além de fazer os programas dos ensaios, visionar instantaneamente os valores da carga aplicada, da velocidade, da temperatura assim como a distância percorrida, o potencial de contacto, o desgaste linear a força de atrito e o coeficiente de atrito. Este *software* também permite guardar os valores medidos ao longo do ensaio num ficheiro em Excel. O desgaste linear e a força de atrito são continuamente medidos por um potenciómetro e um transdutor, a temperatura é medida na face do disco por um pirómetro. Na Tabela 3.3 encontram-se os parâmetros programáveis para o teste decorrer e os parâmetros de saída.

Tabela 3.3: Parâmetros que se podem variar ao longo do ensaio e parâmetros obtidos ao longo do ensaio.

Parâmetros de entrada	Parâmetros de saída
-Velocidade angular -Temperatura -Carga -Duração	-Desgaste -Força de atrito -Temperatura -Potencial de contacto

3.2.1 Geometria dos pinos e do disco

As amostras utilizadas eram cilíndricas, as da PA 66 e da PA 66 +MoS₂ tinham de diâmetro 12 mm e de altura 10 mm, relativamente às da PA66GF30, tinham 15 mm de diâmetro e 10 mm de altura. Quanto aos discos utilizados tinham de diâmetro 76 mm e altura 8 mm. Utilizaram-se os adaptadores da Figura 3.2 que foram fabricados no âmbito deste trabalho de modo a poderem suportar as amostras a testar.



Figura 3.2: Adaptadores utilizados durante o ensaio para colocação das amostras.

3.3 Metodologia experimental

Os ensaios foram realizados no tribómetro de pino sobre disco. Na Tabela 3.4, apresentam-se as condições de pressão de contacto (P), velocidade de deslizamento (v), distância percorrida (L), temperatura ambiente (T), humidade relativa (HR), a rugosidade do disco (Ra), diâmetro do pino e a sua massa inicial.

Antes de se efectuar cada ensaio limpou-se o respectivo disco e amostra com álcool etílico. Pesou-se o pino numa balança analítica Melter da serie GR200, com uma resolução de 0.1 mg e com a capacidade máxima de pesagem de 210g. Posteriormente colocou-se o pino no suporte e fixou-se na bucha de aperto ao braço de carga. Relativamente ao disco, fixou-se no porta discos através de um parafuso. Fez-se a programação do ensaio e obteve-se o respectivo ficheiro de dados. No fim do ensaio efectuou-se uma nova pesagem do pino. Posteriormente efectuou-se o tratamento dos dados obtidos durante o ensaio. E fez-se a análise das superfícies desgastadas.

Tabela 3.4: Condições dos ensaios efectuados.

Pino			Disco	Condições do ensaio				
Material	Diâmetro [mm]	Massa inicial [g]	Ra [μm]	P [MPa]	V [m/s]	L [m]	T [°C]	HR
PA66	12,36	1,4103	0,31	0,42	0,48	7500	24	60
PA66GF30	15,70	2,5214	0,31	0,42	0,48	7500	23	60
PA66MoS ₂	12,76	1,4395	0,31	0,42	0,48	7500	23	60
PA66	12,28	1,3998	0,41	1,04	0,48	7500	23	60
PA66GF30	15,92	2,5576	0,33	1,04	0,48	7500	23	65
PA66MoS ₂	12,80	1,5012	0,25	1,04	0,48	7500	23	50
PA66	12,20	1,3303	0,44	1,46	0,48	7500	22	63
PA66GF30	15,90	2,5510	0,44	1,46	0,48	7500	24	60
PA66MoS ₂	12,78	1,4887	0,44	1,46	0,48	7500	22	63
PA66	12,40	1,4117	0,44	2,92	0,48	7500	23	58
PA66MoS ₂	12,78	1,4907	0,56	2,92	0,48	7500	26	63
PA66GF30	15,84	2,5285	0,56	1,04	1,00	7500	23	63
PA66MoS ₂	12,80	1,4979	0,44	1,04	1,00	7500	22	65
PA66GF30	15,86	2,5329	0,72	1,04	1,50	7500	23	58
PA66MoS ₂	12,78	1,5170	0,72	1,04	1,50	7500	25	60
Ensaio em meio aquoso								
PA66GF30	15,88	2,5470	0,84	1,04	1,00	7500	23	60
PA66MoS ₂	12,80	1,4864	0,78	1,04	1,00	7500	23	60

3.4 Determinação do coeficiente de atrito e de desgaste

O coeficiente de atrito, μ , foi determinado através da seguinte equação

$$\mu = \frac{Fa}{FN}$$

onde Fa é a força de atrito e FN é a carga aplicada.

Determinou-se o volume desgastado através da equação seguinte:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad [\text{mm}^3]$$

com Δm a corresponder à perda de massa e ρ , à massa volúmica. Através da distância percorrida, L , da carga aplicada FN e do volume desgastado, ΔV , determinou-se o coeficiente de desgaste W , com a seguinte equação:

$$W = \frac{\Delta V}{FN \times L} \quad [\text{mm}^3/(\text{N.m})]$$

3.5 Análise das superfícies desgastadas

A análise das superfícies desgastadas é um complemento fundamental para melhor compreensão do comportamento ao atrito e ao desgaste dos materiais. As superfícies desgastadas foram observadas ao microscópio óptico da série Eclipse Lv150, Figura 3.3, projectado e fabricado pela Nikon. Este microscópio tem um conjunto de objectivas da serie CFI LU Plan Fluor BD, que permite ampliações de 5X,10X,20X,50X e 100X, tem um sistema de câmara integrado que permite a recolha e o tratamento das imagens capturadas através do *software*. Este microscópio permite vários ajustes na luminosidade.



Figura 3.3: Microscópio óptico série Eclipse Lv150 utilizado para a observação da superfície dos discos e das amostras.

Resultados Obtidos e Sua Discussão

RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios efectuados. Encontra-se estruturado em secções distintas, respeitantes a cada fase de estudo desenvolvido, com os seguintes objectivos:

- a) Comparar o comportamento tribológico da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30.
- b) Estudar a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de cada material.
- c) Estudar a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30.
- d) Estudar o comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, em meio aquoso.
- e) Analisar as superfícies dos discos após os ensaios, para compreender os mecanismos de desgaste envolvidos e as diferenças no comportamento de cada material.

A primeira fase do trabalho tem como objectivo compreender a diferença do comportamento tribológico de cada material, PA66, PA66+MoS₂ e PA66GF30.

Os materiais poliméricos têm um comportamento muito específico perante variações de temperatura, uma vez que as suas propriedades físicas e mecânicas são muito sensíveis a este parâmetro. Como a temperatura é um factor que é fortemente influenciado pela pressão de contacto, é fundamental realizar ensaios perante diferentes condições de pressão de contacto, para melhor compreender a sua influência no comportamento tribológico dos materiais.

A maioria dos estudos realizados com poliamidas, focam-se no estudo da PA66, por isso torna-se importante realizar ensaios para as outras duas poliamidas em estudo

(PA66+MoS₂ e PA66GF30). Então com o objectivo de compreender a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, realizaram-se ensaios com diferentes velocidades de deslizamento.

Por vezes as poliamidas são utilizadas em situações onde existe bastante humidade, ou mesmo envolvidas em água e como este material é bastante higroscópico, efectuou-se um estudo tribológico em meio aquoso. Como já existem alguns estudos com a PA66, realizou-se um estudo à PA66+MoS₂ e à PA66GF30.

4.1 Comportamento tribológico de cada material PA66, PA66+MoS₂ e PA66GF30

O objectivo deste estudo foi comparar o efeito do reforço da fibra de vidro e a adição do bissulfureto de molibdénio no comportamento tribológico da PA66. Tendo em conta os valores de Pv relatados por Van De Velde and De Baets (1997) para as poliamidas, escolheu-se o valor limite, ou seja um Pv de 0.7 MPa.m/s.

Na Tabela 4.1, encontram-se os parâmetros de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizados durante os ensaios.

Tabela 4.1: Condições de pressão e velocidade utilizados durante os ensaios.

	Pv=0.7 [MPa.m/s]
Pressão de Contacto [MPa]	1.46
Velocidade de deslizamento [m/s]	0.48
Distância percorrida [m]	7500

4.1.1 Comparação do comportamento tribológico dos três materiais em estudo

Na Figura 4.1 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para os três materiais (PA66, PA66+MoS₂ e PA66GF30). Verificou-se que o coeficiente de atrito para da PA66 e da PA66+MoS₂, aumentou acentuadamente na fase inicial, consequência do aumento da área de contacto e do aquecimento por atrito no ensaio (Chang et al., 2006).

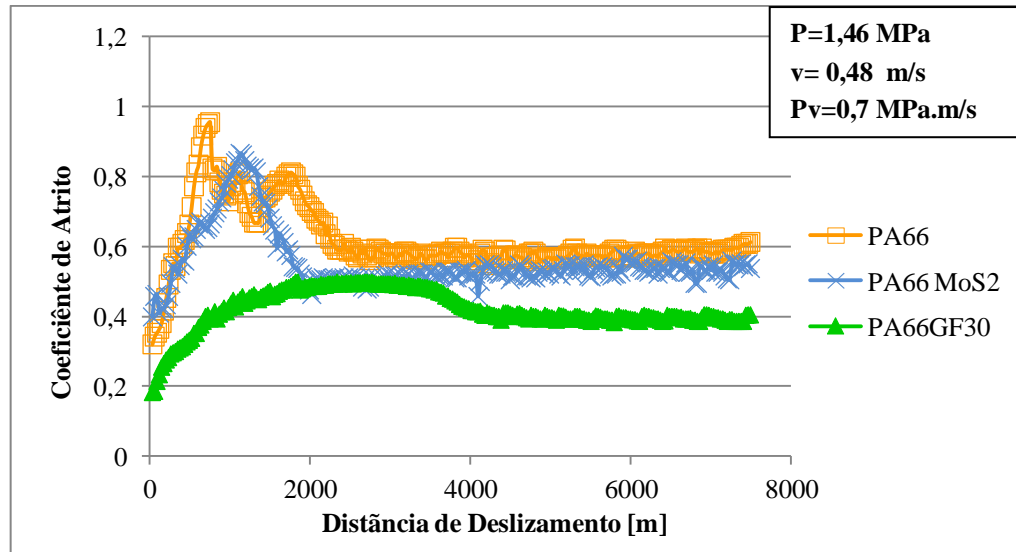


Figura 4.1: Evolução do coeficiente de atrito da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, em função da distância de deslizamento para uma pressão de contacto de 1,46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0,48 m/s.

Na Figura 4.2 pode observar-se a evolução da temperatura em função da distância de deslizamento dos três materiais em estudo.

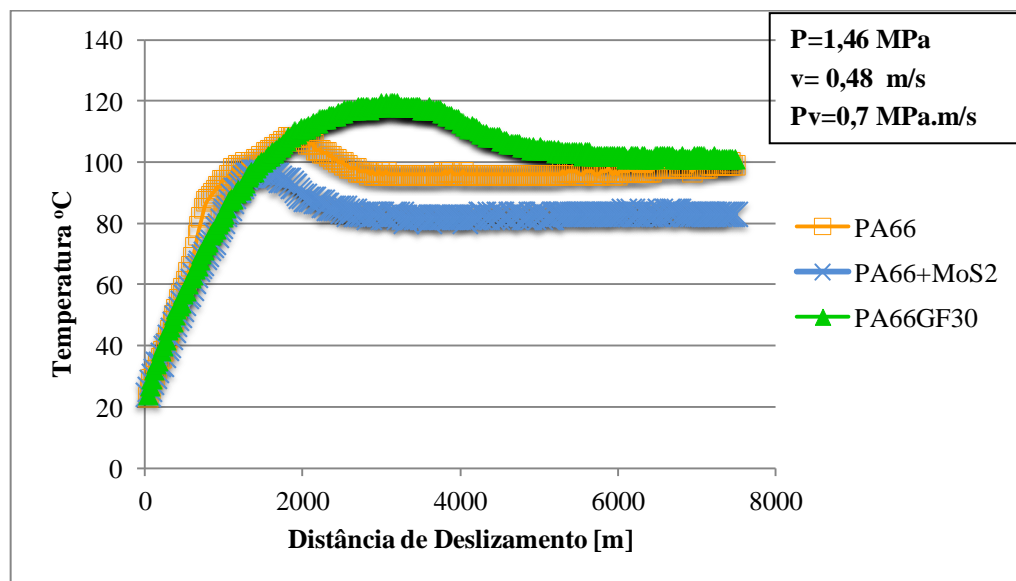


Figura 4.2: Evolução da temperatura da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, em função da distância de deslizamento para uma pressão de contacto de 1,46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0,48 m/s.

Na, Figura 4.3 encontram-se representados os valores do coeficiente de desgaste dos três materiais. Pode observar-se que o material que apresenta um coeficiente de desgaste superior é a PA66+MoS₂ e o que apresenta um menor valor de coeficiente de desgaste é a PA66GF30.

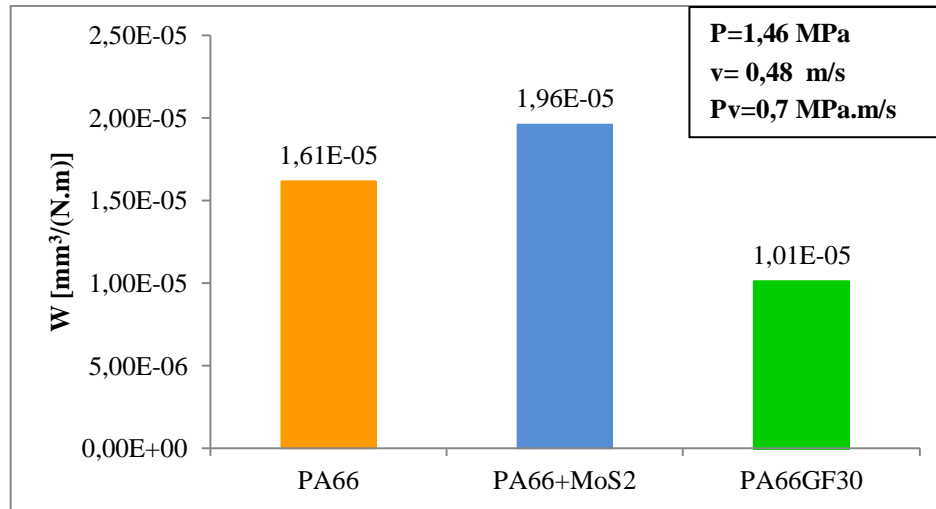


Figura 4.3: Coeficiente de desgaste, W, da PA66, da PA66+MoS₂ e da PA66GF30, para uma pressão de contacto de 1,46 MPa e uma velocidade de deslizamento de 0,48m/s.

A Tabela 4.2, apresenta os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ_s do coeficiente de desgaste W e da temperatura final, T_f , após uma distância de deslizamento de 7500 m, e a temperatura máxima, T_m , registada durante o ensaio, para os três materiais.

Tabela 4.2: Resultados experimentais do coeficiente de desgaste W, do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio dos três materiais à pressão de contacto de 1,46MPa e à velocidade de deslizamento de 0,48 m/s.

Material	W [mm ³ /(N.m)]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
PA66	$1,61 \times 10^{-5}$	0,60	99	108
PA66+MoS ₂	$1,96 \times 10^{-5}$	0,54	83	97
PA66GF30	$1,01 \times 10^{-5}$	0,39	101	119

Como se pode verificar na Tabela 4.2 temperatura máxima atingida pela PA66 e pela PA66+MoS₂, estão acima da temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (85 °C), relativamente à PA66GF30, mantêm-se abaixo da temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (150 °C).

O material que apresentou um menor coeficiente de atrito, foi a PA66GF30 e o material que apresentou um maior valor de coeficiente de atrito foi a PA66. O valor de coeficiente de atrito obtido da PA66, está no intervalo de valores obtidos por Yu et al (2008), 0,6-0,8.

O comportamento tribológico da PA66+MoS₂ está de acordo com o referido por Zhang (1998), uma vez que diminuiu ligeiramente o coeficiente de atrito em relação à PA66, mas piorou a resistência ao desgaste.

A adição do reforço de fibra de vidro trouxe grandes vantagens à utilização da PA66, uma vez que melhorou consideravelmente o seu comportamento ao atrito e ao desgaste.

4.1.1.1 Comparação das superfícies dos discos após deslizamento dos três materiais

Na Figura 4.4, podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do MO, após o deslizamento de cada material ($P_v=0,7$ MPa.m/s) e para termo de comparação a imagem do disco rectificadado, Figura 4.4a. Como se pode verificar a deposição de material foi diferente para os três ensaios, contudo o mecanismo de desgaste predominante é a formação de tribofilme. Na Figura 4.4b, pode verificar-se que a PA66 aderiu no aço e formou um filme de material bastante irregular. Relativamente à PA66+MoS₂ Figura 4.4c, nota-se que houve adesão de material o que proporcionou a formação do filme, contudo este filme apresenta algumas falhas. Quanto à PA66GF30, Figura 4.4d, existem três mecanismos de desgaste envolvidos, a abrasão a adesão e o tribofilme.

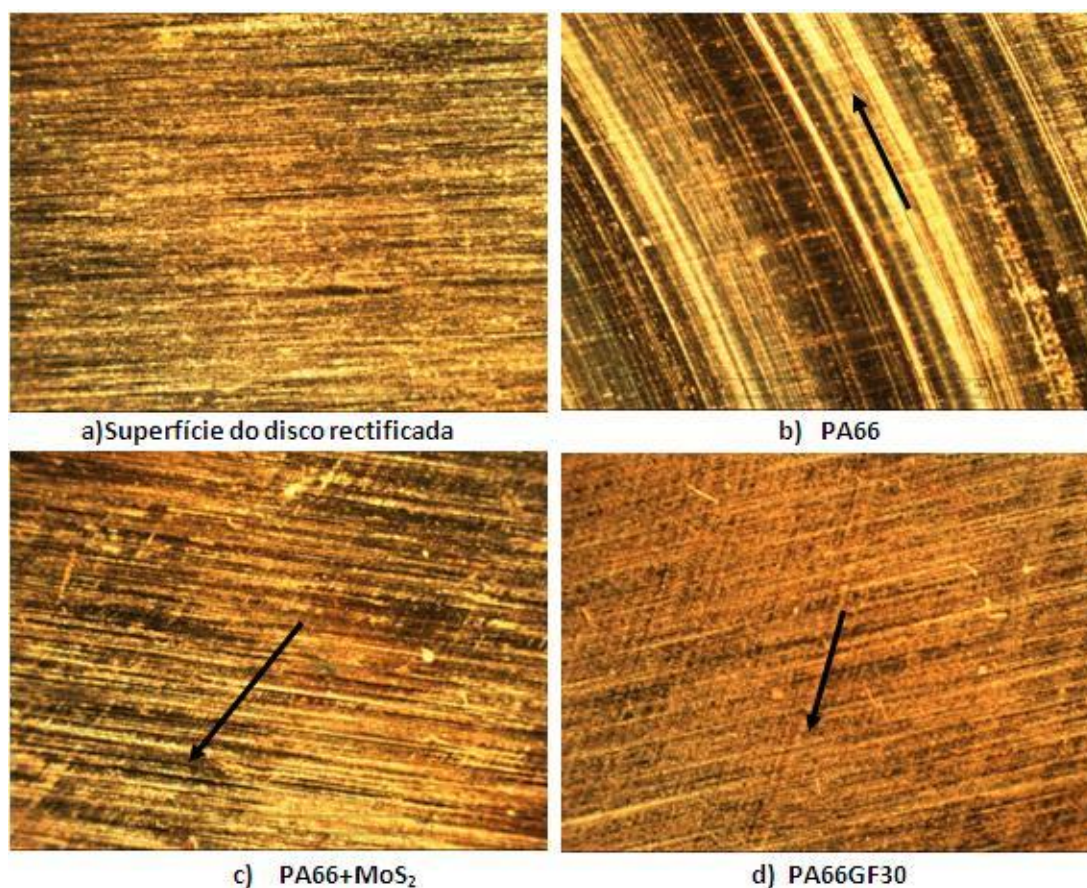


Figura 4.4:Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaio com $P_v=0.7$ MPa.m/s.

Após a análise da Figura 4.4, é mais perceptível o comportamento tribológico de cada material num escorregamento a seco com o aço como material antagonista. A PA66GF30 exibiu um melhor desempenho perante as mesmas condições de

escorregamento que os outros dois materiais. O seu valor de coeficiente de atrito foi consideravelmente inferior ao dos outros materiais. Na Figura 4.4, pode verificar-se que a estabilidade do filme formado é superior à do filme formado pela PA66 e pela PA66+MoS₂, o que facilita o escorregamento do material e consequentemente diminuiu o coeficiente de atrito e desgaste (Yu et al., 2008).

O filme formado pela PA66+MoS₂, Figura 4.4c, tem uma estabilidade superior ao formado pela PA66, Figura 4.4b, o que poderá ser um dos motivos para o seu coeficiente de atrito ser ligeiramente inferior ao da PA66.

4.2 Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de cada material

Realizaram-se ensaios com diferentes pressões de contacto para compreender a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de cada material. Na Tabela 4.3, apresentam-se as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento, utilizadas nos ensaios efectuados.

Tabela 4.3: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas.

	P_v=0,2 [MPa.m/s]	P_v=0,5 [MPa.m/s]	P_v=0,7 [MPa.m/s]	P_v=1,4 [MPa.m/s]
Pressão de Contacto [MPa]	0,42	1,04	1,46	2,92
Velocidade de deslizamento [m/s]	0,48	0,48	0,48	0,48
Distância percorrida [m]	7500	7500	7500	7500

4.2.1 Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66

Na Figura 4.5, pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados à PA66 com diferentes pressões de contacto. Da análise dos resultados, verifica-se que o coeficiente de atrito tende a diminuir com o aumento da pressão. Para os três ensaios realizados com pressões superiores (1,04, 1,46 e 2,92MPa), o coeficiente de atrito tem uma subida acentuada e após atingir um valor máximo diminui e atinge uma fase estacionária. O facto de diminuir após um valor máximo e estacionar num valor, corresponde ao comportamento de formação de filme, como mencionaram Yu et al (2008). Relativamente ao primeiro ensaio, é notório que os fenómenos envolventes são diferentes dos restantes ensaios. Esta diferença está relacionada com a formação do filme, uma vez que depende da pressão aplicada (Rymuza, 2007).

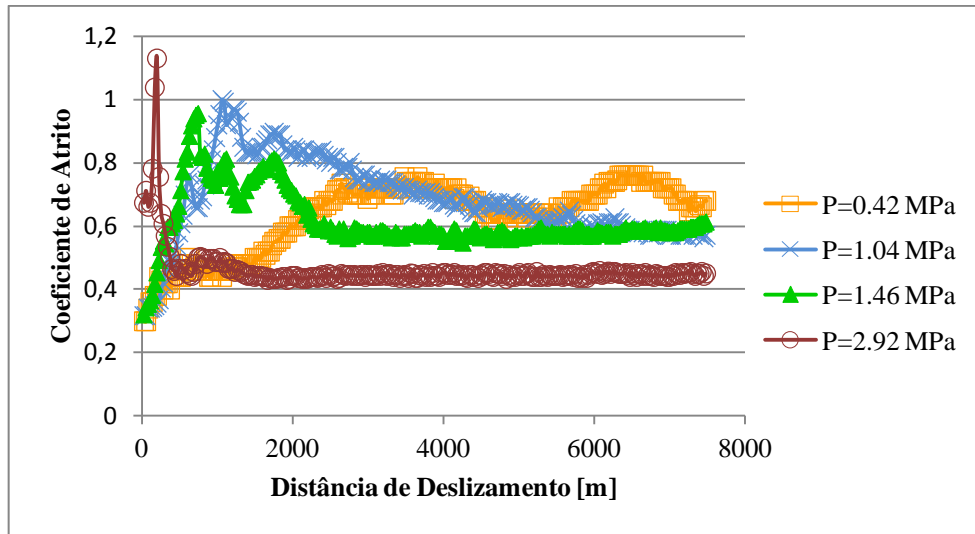


Figura 4.5: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.6, pode observar-se a evolução da temperatura, da PA66, em função da distância de deslizamento dos quatro ensaios realizados a diferentes pressões de contacto. Pode verifica-se que a temperatura aumentou com o aumento da pressão de contacto, contudo nos ensaios realizados com as pressões de contacto de 1,46 e 2,92 MPa, a temperatura estaciona quase no mesmo valor.

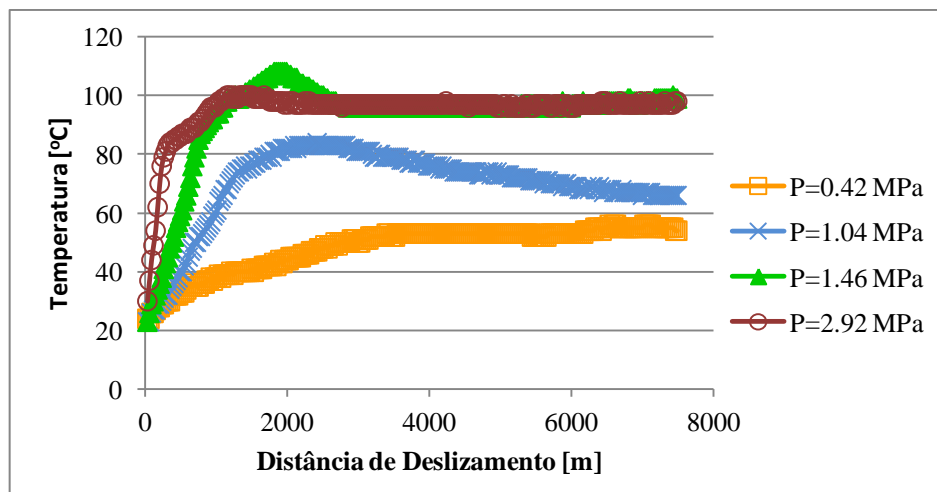


Figura 4.6: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento da PA66, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.7 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste, W, obtidos para a PA66 ensaiada a diferentes pressões de contacto. O coeficiente de desgaste aumentou com o aumento da pressão de contacto para os três ensaios com pressões inferiores (0,42, 1,04 e 1,46), contudo este aumento não se verificou no ensaio com a

pressão de contacto de 2,92 MPa, uma vez que o seu valor se manteve constante em relação ao ensaio com a pressão de contacto de 1,46 MPa.

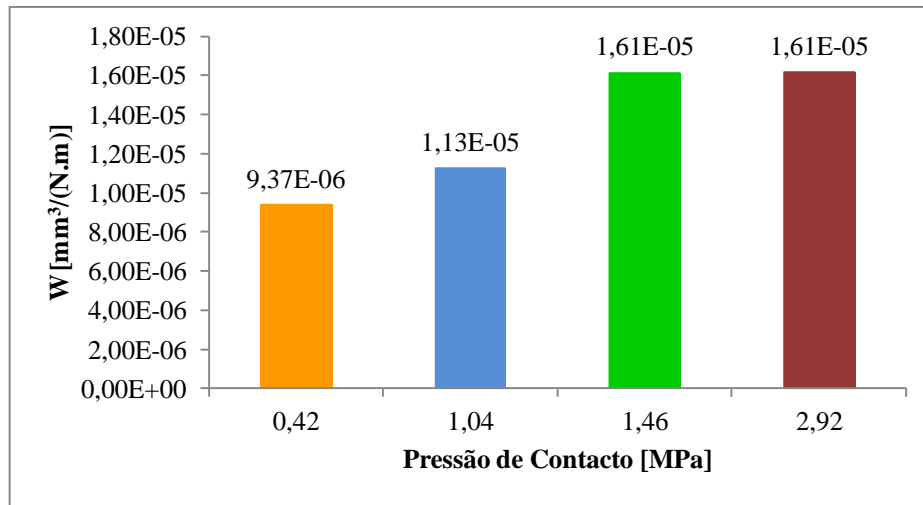


Figura 4.7: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste W , da PA66, nos ensaios com diferentes pressões de contacto.

A Tabela 4.4, apresenta os resultados experimentais dos ensaios efectuados à PA66 com diferentes pressões de contacto, do coeficiente de atrito, μ_s do coeficiente de desgaste W e da temperatura final, T_f , após uma distância de deslizamento de 7500 m, assim como a temperatura máxima, T_m , registada durante cada ensaio.

Tabela 4.4: Resultados experimentais obtidos nos ensaios efectuados com diferentes pressões de contacto à PA66, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.

Pressão de contacto [MPa]	W [mm³/(N.m)]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
0,42	$9,37 \times 10^{-6}$	0,67	55	56
1,04	$1,13 \times 10^{-5}$	0,57	66	84
1,46	$1,61 \times 10^{-5}$	0,60	99	108
2,92	$1,61 \times 10^{-5}$	0,45	97	100

Da análise da Tabela 4.4, pode verificar-se que nos dois ensaios efectuados com as pressões de contacto superiores (1,46 e 2,92 MPa), a temperatura final está acima da temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (85°C). Existem diferenças nos resultados da temperatura máxima e final dos quatro ensaios.

Nos ensaios efectuados, pode verificar-se que a pressão de contacto é um parâmetro que influencia o comportamento tribológico da PA66.

4.2.1.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento da PA66 a diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.8, podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do MO, após deslizamento, dos ensaios realizados à PA66 com diferentes pressões de contacto. Em todos os ensaios houve adesão de material ao disco, contudo o mecanismo predominante é o tribofilme. Podem observar-se diferenças significativas quanto à deposição de material no disco nos quatro ensaios. Relativamente à estabilidade do filme formado, os ensaios com $P=1,42$ e $2,92$ MPa apresentam maior estabilidade e um comportamento semelhante, como se pode observar nas Figura 4.8c e Figura 4.8d, respectivamente. Do ensaio com $P=0,42$, para o ensaio com $P=1,04$ MPa, Figura 4.8a e Figura 4.8b, aumenta a adesão de material, contudo ainda se notam grandes falhas no filme formado. O ensaio que apresenta menor adesão de material no disco é o de $0,42$ MPa, Figura 4.8a.

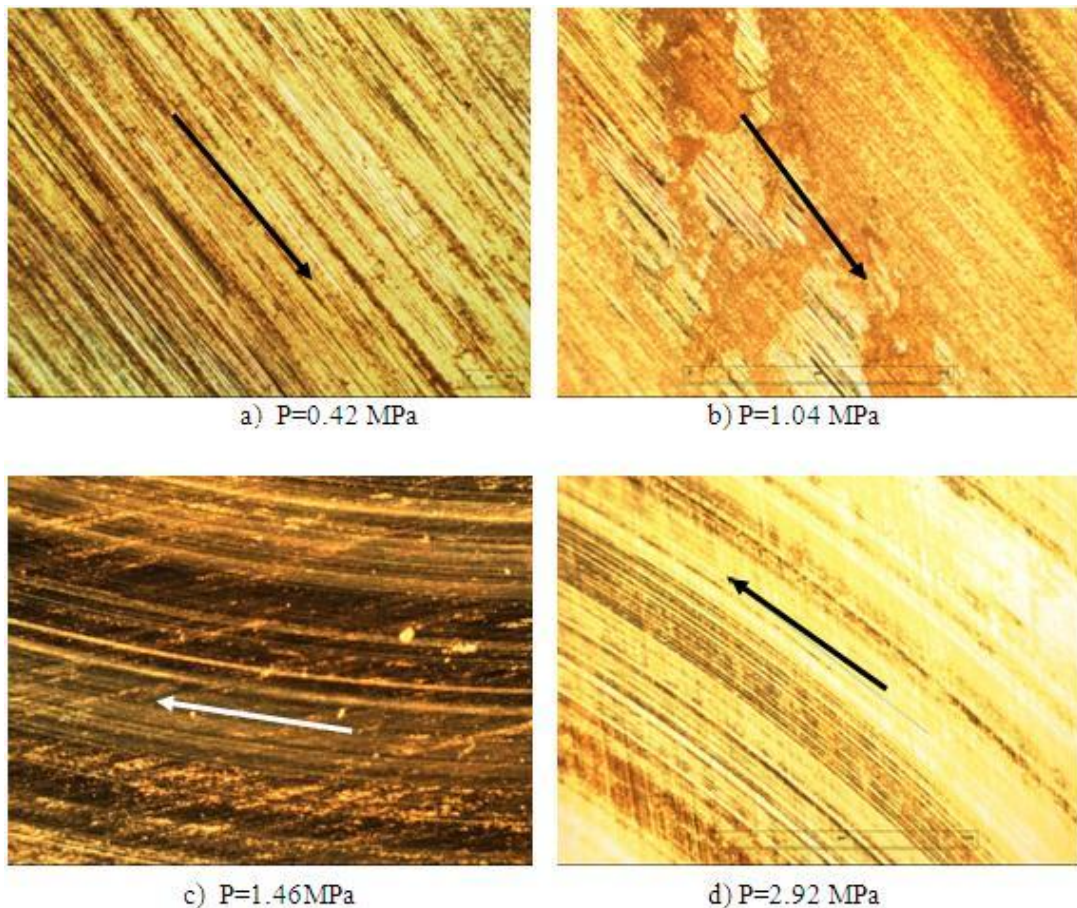


Figura 4.8: Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66 com diferentes pressões de contacto.

A estabilidade do filme influenciaram o comportamento tribológico da PA66. Como se verificou anteriormente, os ensaios realizados à pressão de contacto de 1,42 MPa e 2,92 MPa, apresentam um coeficiente de desgaste igual, mas apresentam coeficientes de atrito diferentes, essa diferença pode estar relacionada com a estabilidade do filme formado. Na Figura 4.8, pode observar-se que no ensaio realizado à pressão de contacto de $P=2,92$ MPa, o material aderiu de um modo mais uniforme que no ensaio realizado à pressão de contacto de $P=1,42$ MPa.

4.2.2 Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66+MoS₂

Na Figura 4.9, pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito, em função da distância de deslizamento, obtida ao longo dos ensaios efectuados à PA66+MoS₂ com diferentes pressões de contacto. O comportamento do coeficiente de atrito nos três ensaios realizados com pressões de contacto superiores (1,04, 1,46, 2,92 MPa), sugere que houve formação de filme. Neste material (PA66+MoS₂) o coeficiente de atrito parece não variar com o aumento da pressão de contacto. O ensaio que apresentou maior coeficiente de atrito foi realizado com a pressão de contacto de 0,42 MPa e os ensaios que apresentaram um menor coeficiente de atrito foram os realizados com as pressões de contacto de 1,04 e 1,46 MPa.

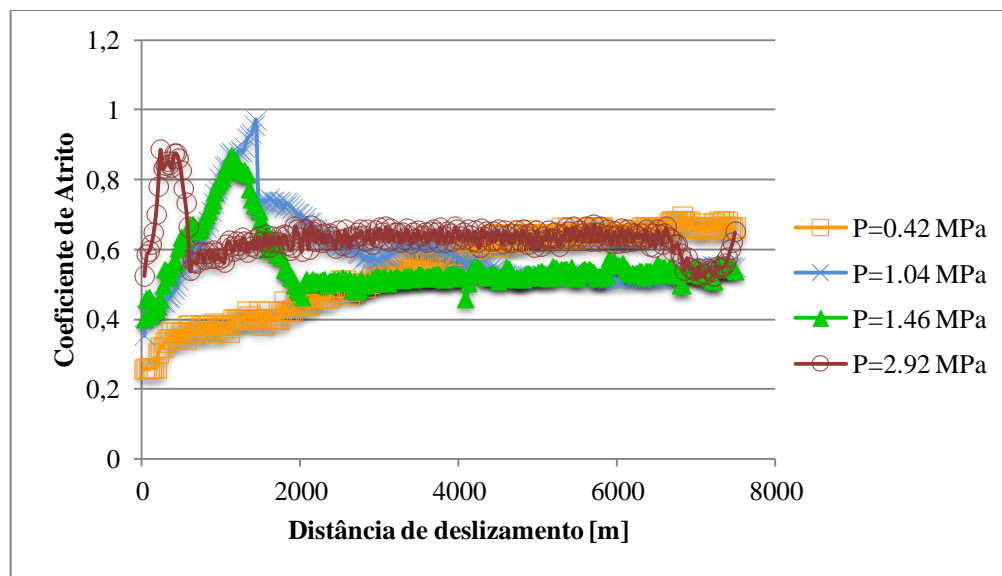


Figura 4.9: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66+MoS₂, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.10, pode observar-se a evolução da temperatura em função da distância de deslizamento, obtida ao longo dos ensaios realizados à PA66+MoS₂, com diferentes

pressões de contacto. Nos dois ensaios realizados com pressões de contacto superiores (1,46 e 2,92MPa), a temperatura estabilizou num valor acima da temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (85°C).

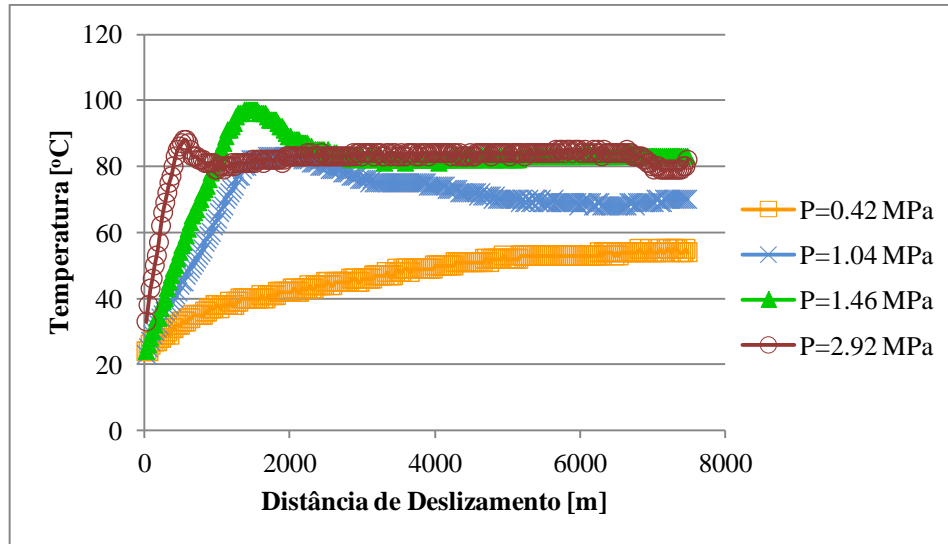


Figura 4.10: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados à PA66+MoS₂, a diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.11, apresentam-se os valores do coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, obtido nos ensaios realizados a diferentes pressões de contacto. Como se pode observar o coeficiente de desgaste, aumentou com o aumento da pressão de contacto.

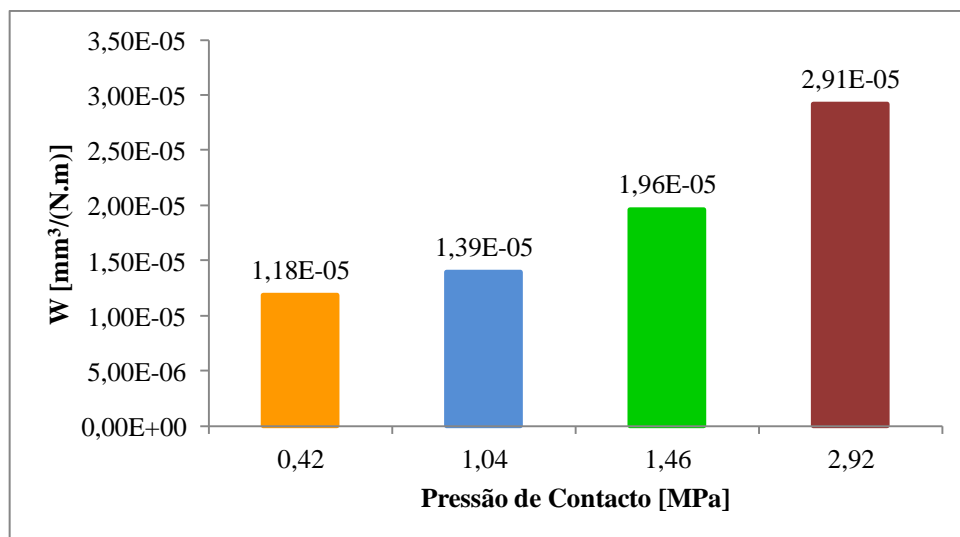


Figura 4.11: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS₂ em função da pressão de contacto aplicada.

Na Tabela 4.5 apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios efectuados à PA66+MoS₂ a diferentes pressões de contacto, do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste W e da temperatura final, T_f , após uma distância de deslizamento de 7500 m, assim como da temperatura máxima, T_m , registada durante o ensaio.

Tabela 4.5: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes pressões de contacto para a PA66+MoS₂, do coeficiente de desgaste W, do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio, T_m .

Pressão de contacto [MPa]	W [mm ³ /(N.m)]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
0,42	$1,18 \times 10^{-5}$	0,67	54	55
1,04	$1,39 \times 10^{-5}$	0,54	70	83
1,46	$1,96 \times 10^{-5}$	0,54	83	97
2,92	$2,91 \times 10^{-5}$	0,56	79	88

O comportamento tribológico da PA66+MoS₂, é influenciado pela pressão de contacto. Da análise dos resultados em geral, Tabela 4.5, pode verificar-se que o comportamento ao atrito deste material não é muito conclusivo.

4.2.2.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento da PA66+MoS₂ a diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.12, podem observar-se as imagens da superfície dos discos após deslizamento da PA66+MoS₂ a diferentes pressões de contacto, obtidas através do MO. Da análise da Figura 4.12 parece que os mecanismos de desgaste predominantes são adesão e a formação de tribofilme. Neste conjunto de imagens pode observar-se que existem diferenças na deposição de material nos quatro ensaios, contudo todos tem em comum um filme pouco estável. Com o aumento da pressão de contacto parece que também houve aumento da quantidade de material depositado no disco.

O ensaio onde se observou um menor coeficiente de atrito, foi no ensaio realizado à pressão de contacto de 0,42 MPa, da análise da Figura 4.12, verifica-se que esse ensaio é o que apresenta uma superfície do disco com menor deposição de material e também o que apresenta um filme menos abundante e bastante irregular.

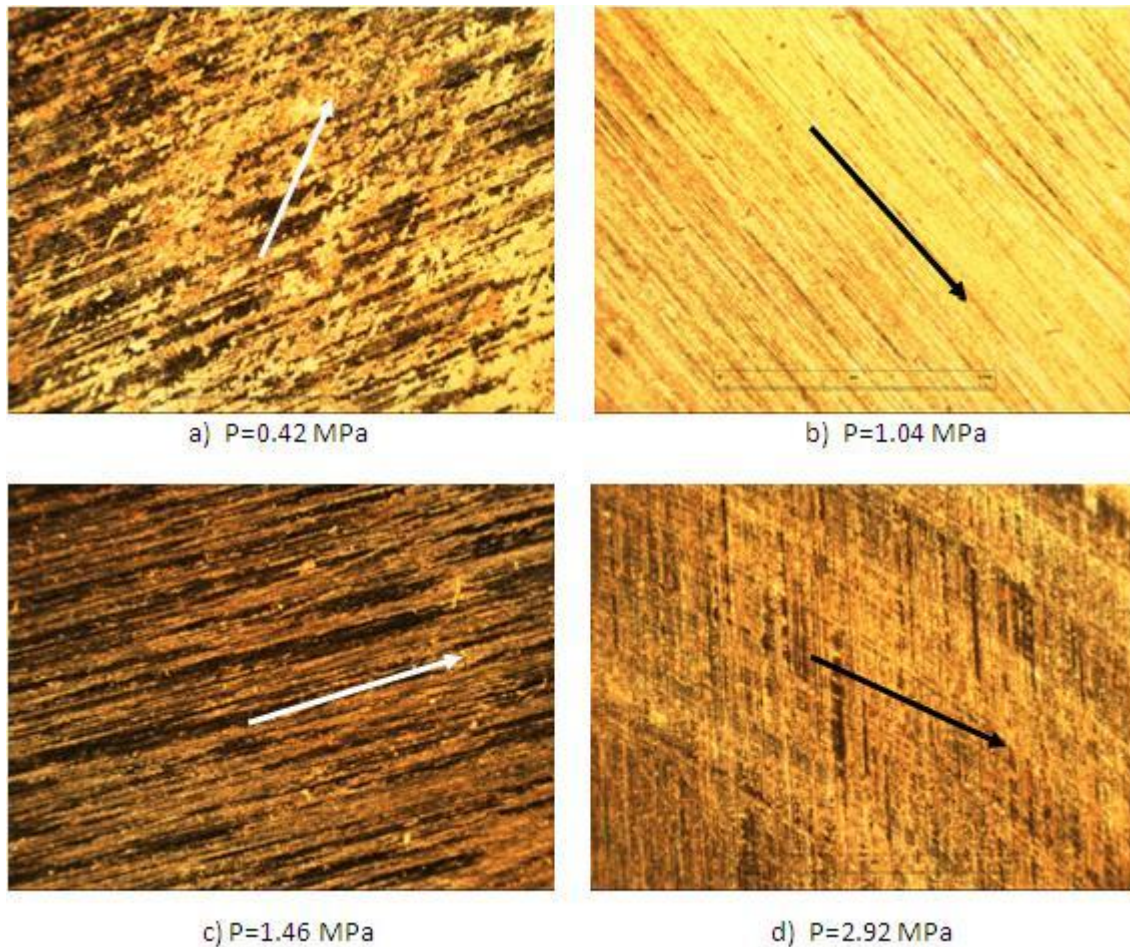


Figura 4.12: Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66+MoS₂ a diferentes pressões de contacto.

4.2.3 Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico da PA66GF30

Na Figura 4.13, pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida ao longo dos ensaios realizados à PA66GF30 com diferentes pressões de contacto. A evolução do coeficiente de atrito foi diferente nos três ensaios. Pode verificar-se que o comportamento do coeficiente de atrito ao longo do ensaio realizado com a pressão de contacto superior (1,46 MPa) é bastante diferente dos restantes ensaios. O ensaio que apresentou um maior coeficiente de atrito foi o realizado à pressão de contacto de 1,04 MPa e o que apresentou menor valor foi o realizado à pressão de contacto de 1,46 MPa.

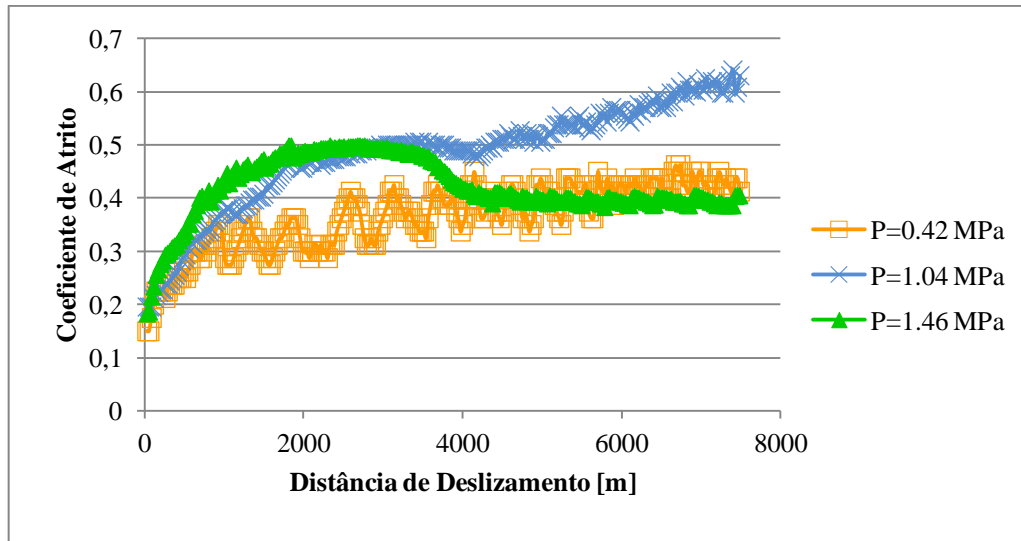


Figura 4.13: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66GF30, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.14, pode observar-se a evolução da temperatura na superfície do disco em função da distância de deslizamento, obtida ao longo dos ensaios realizados com a PA66GF30 com diferentes pressões de contacto. Em geral, pode verificar-se que a temperatura aumentou com o aumento da pressão de contacto. A temperatura máxima atingida em todos os ensaios está abaixo da temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (150°C).

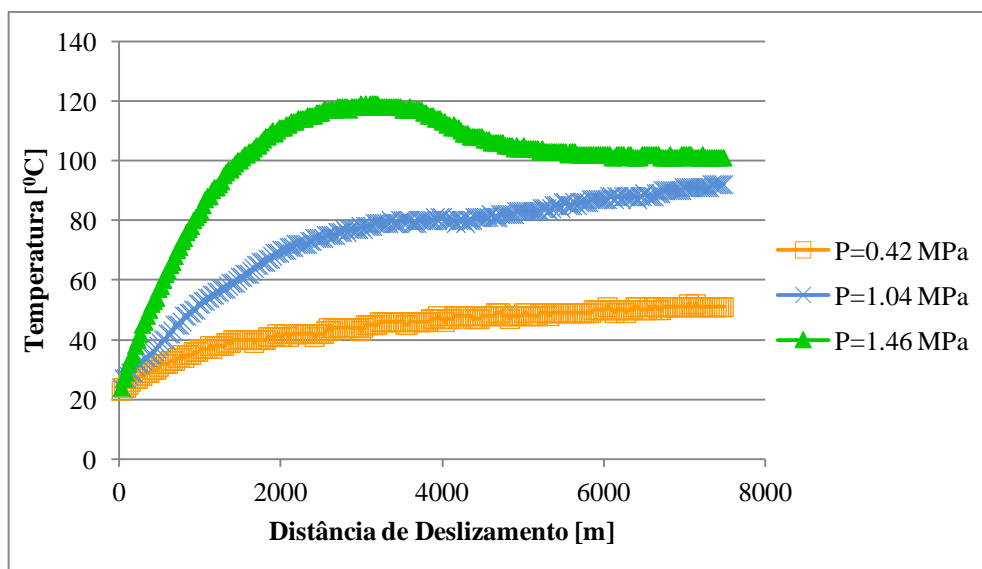


Figura 4.14: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.15, apresentam-se os coeficientes de desgaste obtidos nos ensaios realizados à PA66GF30 com diferentes pressões de contacto. O coeficiente de desgaste aumentou com aumento da pressão de contacto.

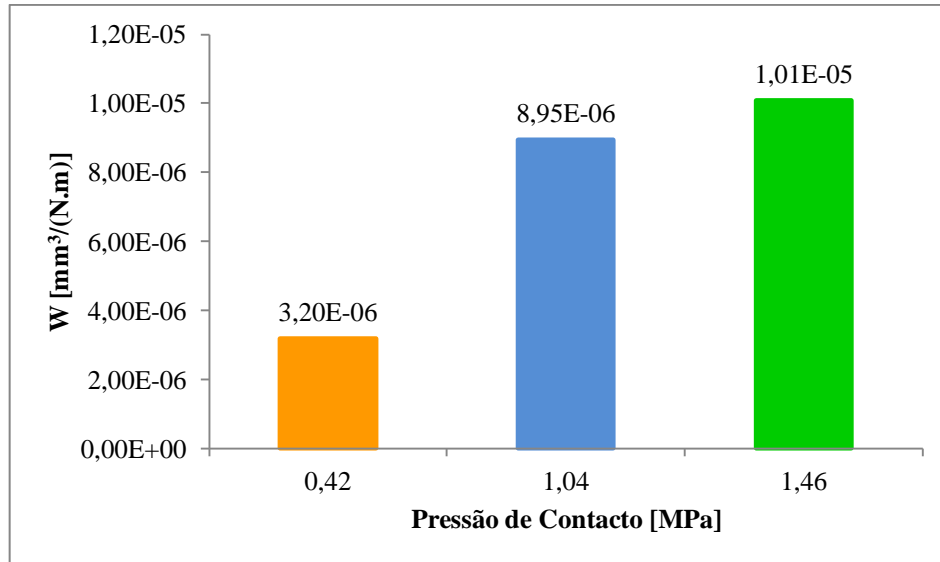


Figura 4.15: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66GF30, em função da pressão de contacto.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados experimentais dos ensaios efectuados à PA66GF30 com diferentes pressões de contacto, do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W e da temperatura final, T_f , obtidos após uma distância de deslizamento de 7500 m, assim como da temperatura máxima, T_m , registada durante cada ensaio.

Tabela 4.6: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes pressões de contacto para a PA66GF30, do coeficiente de desgaste W, do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.

Pressão de contacto [MPa]	W [mm³/N.m]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
0,42	$3,2 \times 10^{-6}$	0,43	51	52
1,04	$8,95 \times 10^{-6}$	0,62	92	92
1,46	$10,07 \times 10^{-6}$	0,39	101	119

O comportamento tribológico da PA66GF30 é sensível a variações da pressão de contacto. Na Tabela 4.6 pode verificar-se que a temperatura máxima atingida nos ensaios aumenta com o aumento da pressão de contacto, assim como o coeficiente de desgaste.

4.2.3.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento da PA66GF30, para diferentes pressões de contacto.

Na Figura 4.16 podem observar-se as imagens obtidas através do MO, das superfícies dos discos após os ensaios da PA66GF30 realizados a diferentes pressões de contacto. Este tipo de material sofreu predominantemente adesão e abrasão, contudo no ensaio realizado à pressão superior, Figura 4.16c, parece existir formação de tribofilme. É notória a diferença da disposição de material nos três ensaios. Quanto maior a pressão aplicada maior a quantidade de material aderida ao disco.

Comparando a superfície do disco do ensaio realizado à pressão de contacto de 1,04 MPA, Figura 4.16b, com a superfície do disco do ensaio realizado à pressão de contacto de 0,42MPa, Figura 4.16a, pode verificar-se que existe uma forte deposição de material de um ensaio relativamente ao outro, consequência do aumento do coeficiente de atrito. Parece que houve formação de tribofilme no ensaio realizado à pressão de contacto superior, como se pode verificar da análise da Figura 4.16c. O filme formado apresenta bastante estabilidade e uniformidade. O que parece justificar a diminuição do coeficiente de atrito que o material sofreu neste ensaio relativamente aos outros ensaios.

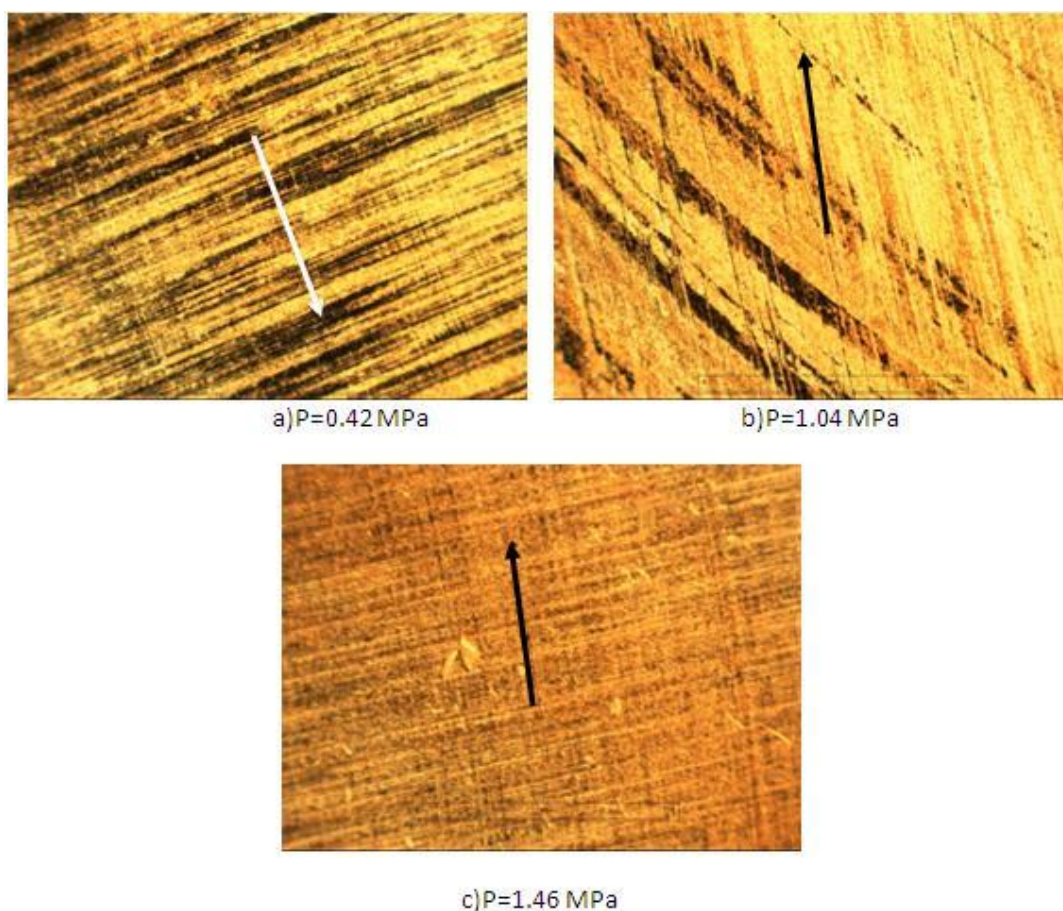


Figura 4.16: Imagens da superfície do disco (MO 50x), após ensaios da PA66GF30 a diferentes pressões de contacto.

4.3 Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30

Com o objectivo de compreender o comportamento tribológico da PA66+ MoS₂ e da PA66GF, perante variações da velocidade de deslizamento, realizaram-se três ensaios com velocidades diferentes. Na Tabela 4.7, encontram-se as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento, utilizadas nos ensaios efectuados.

Tabela 4.7: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios.

	P _v =0,5 [MPa.m/s]	P _v =1,04 [MPa.m/s]	P _v =1,56 [MPa.m/s]
Pressão de Contacto [MPa]	1,04	1,04	1,04
Velocidade de deslizamento [m/s]	0,48	1	1,5
Distância percorrida [m]	7500	7500	7500

4.3.1 Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66+MoS₂

A evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66+MoS₂, para os ensaios efectuados com diferentes velocidades de deslizamento, encontra-se na Figura 4.17. Pode observar-se que este material mantém um comportamento muito semelhante nos três ensaios, verificando-se que a velocidade de deslizamento é um parâmetro que parece não ter uma influência muito significativa no comportamento ao atrito.

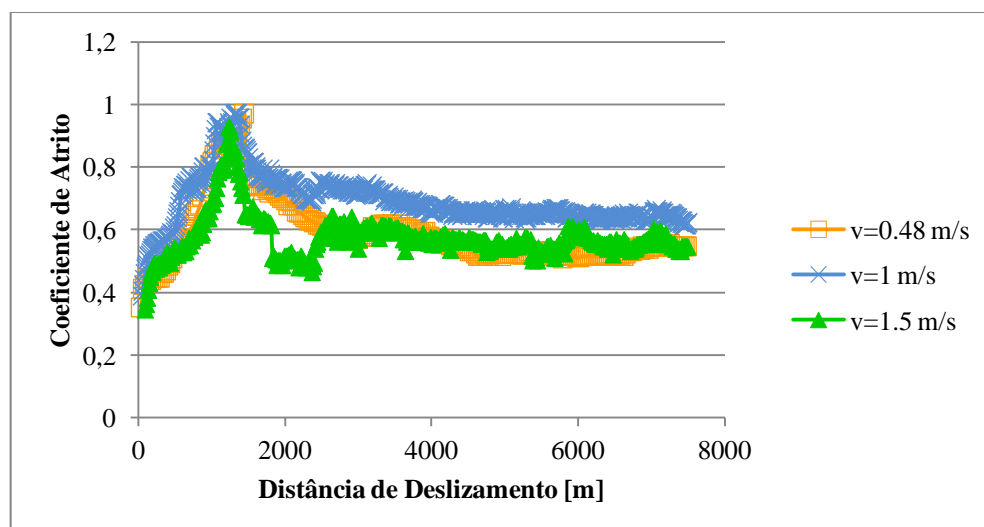


Figura 4.17: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66+MoS₂, para as diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.18 pode observar-se a evolução da temperatura na superfície do disco em função da distância de deslizamento, dos ensaios realizados com a PA66+MoS₂ a diferentes velocidades de deslizamento. Através da análise da Figura 4.18, pode verificar-se que o material sofreu um maior aquecimento nos ensaios realizados com as duas velocidades superiores (1 e 1,5 m/s) e que em ambos os casos estabilizou a uma temperatura superior à temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (85°C)

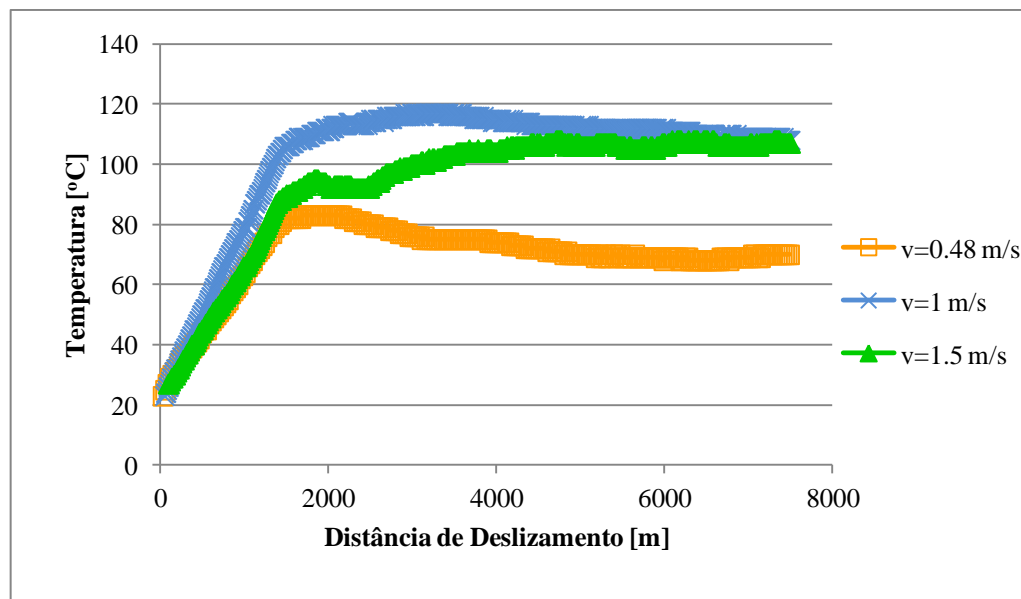


Figura 4.18:Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66+MoS₂ para as diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.19, apresentam-se os valores de coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, obtidos nos ensaios realizados com diferentes velocidades de deslizamento. O coeficiente de desgaste, sofreu grandes alterações com a velocidade de deslizamento. O ensaio efectuado à velocidade de deslizamento de 1,5 m/s apresenta um valor de coeficiente de desgaste bastante superior aos outros ensaios. Ou seja nesta gama de velocidades de deslizamento a resistência ao desgaste deste material é bastante sensível a variações de velocidade.

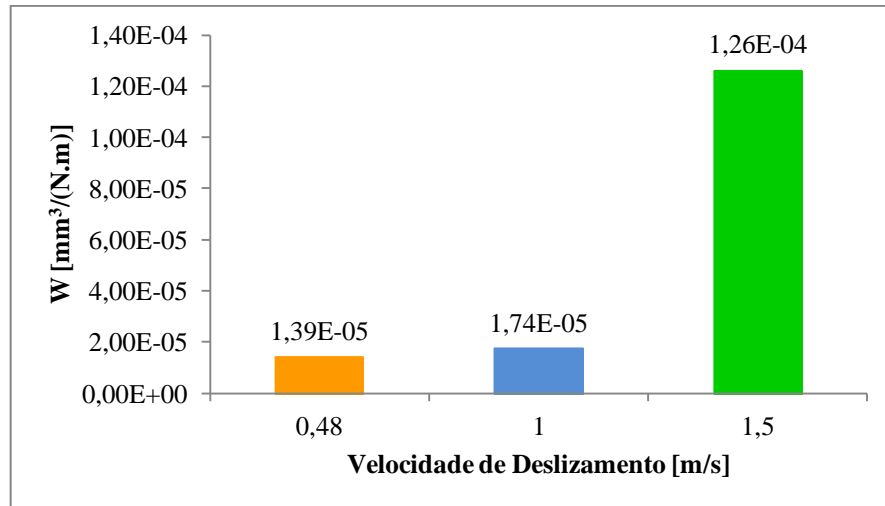


Figura 4.19: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS₂, em função da velocidade de deslizamento.

Na Figura 4.20, pode observar-se uma imagem da amostra após o ensaio realizado à velocidade de 1.5 m/s, nesta imagem vê-se algum material que foi desintegrado da amostra e que ao longo do escorregamento foi aderindo novamente na amostra

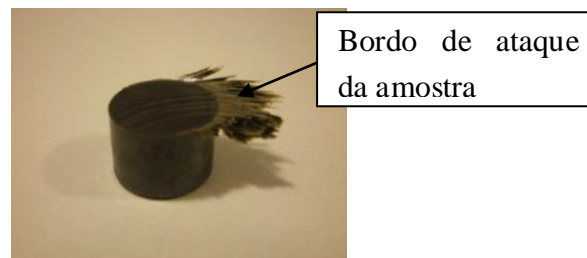


Figura 4.20: Amostra da PA66+MoS₂, após o ensaio com a velocidade de deslizamento de 1.5m/s.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios da PA66+MoS₂ com diferentes velocidades de deslizamento, do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W e da temperatura final, T_f , após uma distância de deslizamento de 7500 m, assim como a temperatura máxima, T_m , registada durante cada ensaio.

Tabela 4.8: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes velocidades de deslizamento para a PA66+MoS₂, do coeficiente de desgaste W, do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima registada durante o ensaio.

Velocidade de deslizamento [m/s]	W [mm³/(N.m)]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
0,48	$0,90 \times 10^{-5}$	0,62	92	92
1,0	$1,74 \times 10^{-5}$	0,62	108	117
1,5	$12,6 \times 10^{-5}$	0,54	107	108

Como se pode verificar na Tabela 4.8, o comportamento tribológico da PA66+MoS₂, é sensível a variações de velocidade, principalmente no que respeita ao desgaste sofrido.

4.3.1.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento da PA66+MoS₂, a diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.21, podem observar-se as imagens obtidas através do MO, das superfícies dos discos após os ensaios da PA66+MoS₂ efectuados a diferentes velocidades de deslizamento. Os mecanismos de desgaste predominantes são a adesão e a formação de tribofilme. Pode verificar-se que a deposição de material no disco varia com a velocidade de deslizamento. No ensaio realizado à velocidade superior (1,5m/s), Figura 4.21c, é notória a forte deposição de material.

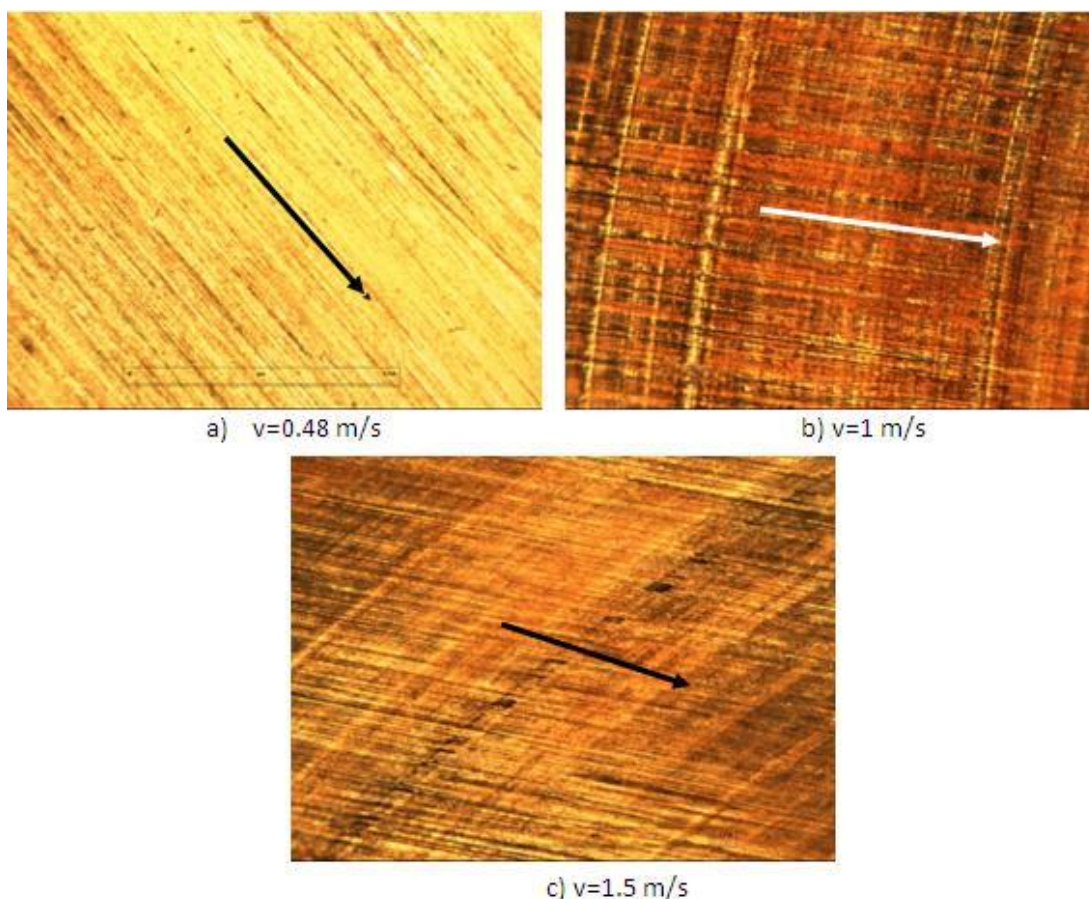


Figura 4.21: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios da PA66+MoS₂ a diferentes velocidades de deslizamento.

4.3.2 Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico da PA66GF30

Na Figura 4.22 pode observar-se a variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66GF30 para os três ensaios realizados com diferentes velocidades de deslizamento. Pode verificar-se que o coeficiente de atrito parece tender a diminuir com o aumento da velocidade de deslizamento.

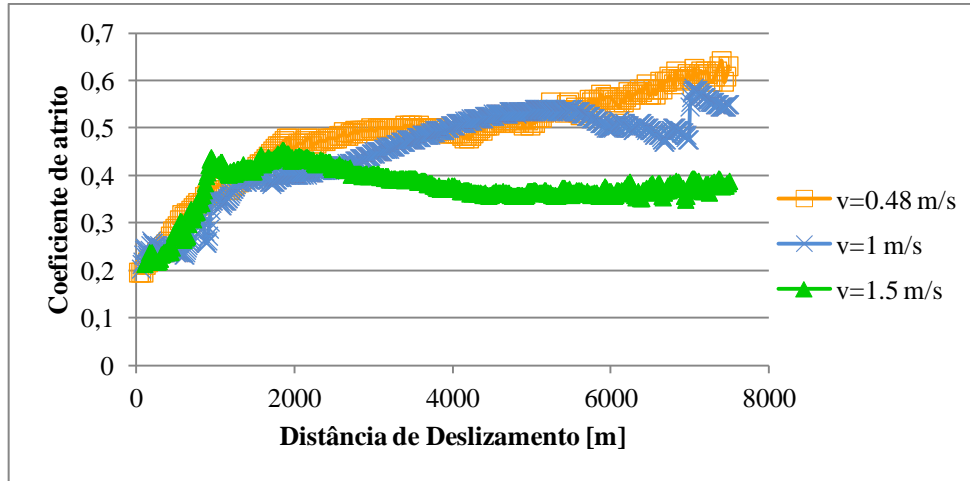


Figura 4.22: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para as diferentes velocidades de deslizamento.

A evolução da temperatura na superfície do disco em função da distância de deslizamento, da PA66GF30 dos ensaios efectuados a diferentes velocidades de deslizamento apresenta-se na Figura 4.23. Os dois ensaios realizados com velocidades superiores (1 e 1,5m/s), atingiram temperaturas mais elevadas. Contudo os valores de temperatura obtidos, ainda estão abaixo da temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (150°C).

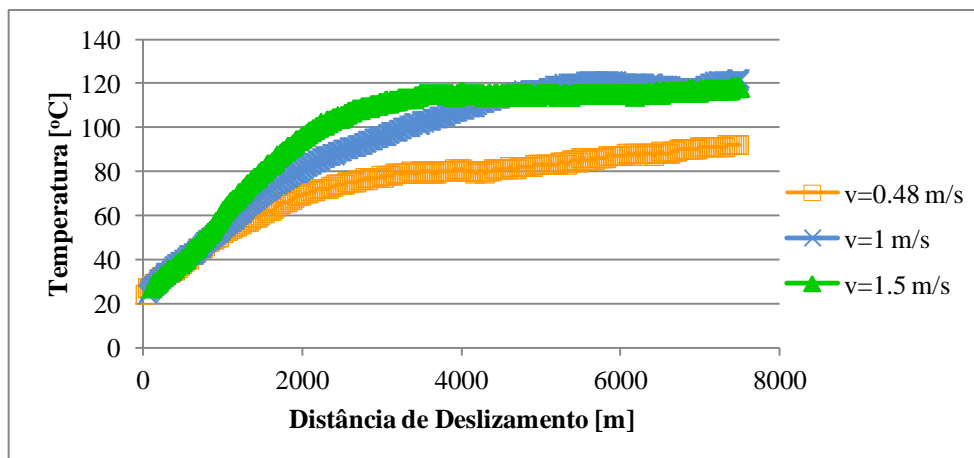


Figura 4.23: Variação da temperatura em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para as diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.24, encontram-se os valores de coeficiente de desgaste obtidos nos ensaios com diferentes velocidades de deslizamento da PA66GF30. O ensaio que apresentou um menor coeficiente de desgaste foi o ensaio realizado com a velocidade de deslizamento de 0,42 m/s e o ensaio que apresentou um maior coeficiente de desgaste foi o realizado com a velocidade de deslizamento de 1,0 m/s.

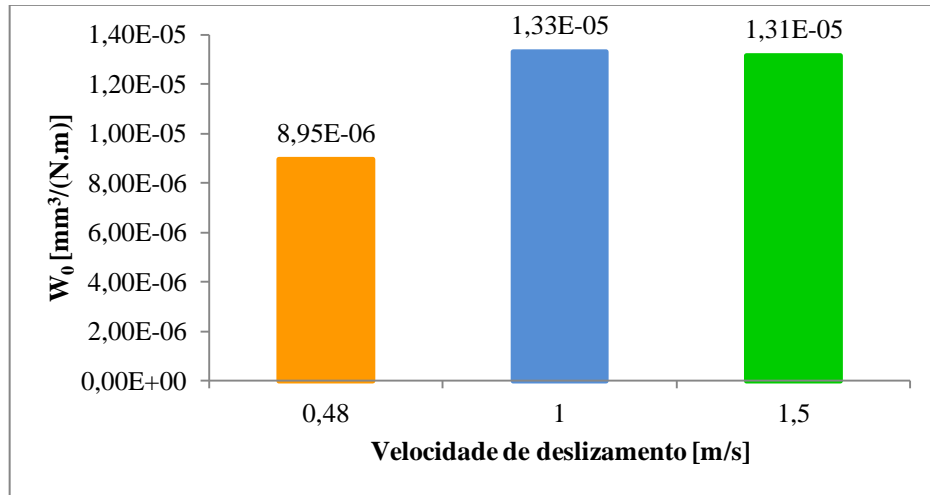


Figura 4.24: Resultados obtidos do coeficiente de desgaste, W , da PA66GF30, em função da velocidade de deslizamento.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados experimentais obtidos após os ensaios realizados à PA66GF30 com diferentes velocidades de deslizamento, do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W e da temperatura final, T_f , após uma distância de deslizamento de 7500 m, assim como a temperatura máxima, T_m , registada durante o ensaio.

Tabela 4.9: Resultados experimentais obtidos nos ensaios com diferentes velocidades de deslizamento para a PA66GF30, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ , da temperatura final T_f e a temperatura máxima atingida durante o ensaio.

Velocidade de deslizamento [m/s]	W [mm³/(N.m)]	μ	T_f [°C]	T_m [°C]
0.48	$0,9 \times 10^{-5}$	0,62	92	92
1.0	$1,33 \times 10^{-5}$	0,57	122	122
1.5	$1,31 \times 10^{-5}$	0,38	118	118

O comportamento tribológico da PA66GF30 é influenciado pela velocidade de deslizamento, como se pode verificar na Tabela 4.9. Nestas condições de pressão de

contacto, o ensaio com a velocidade de deslizamento superior (1,5m/s) é o que apresenta melhores resultados de coeficiente de atrito.

4.3.2.1 Comparação das superfícies dos discos e das amostras após o deslizamento da PA66GF30, a diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.25 encontram-se as imagens obtidas através do MO, da superfície dos discos após os ensaios realizados à PA66GF30 com diferentes velocidades de deslizamento. Da observação das imagens, pode verificar-se que os mecanismos de desgaste predominante são a adesão, a abrasão e a formação de tribofilme. Nos ensaios realizados com velocidades de deslizamento diferentes, a deposição de material teve um comportamento semelhante, contudo pode observar-se que com o aumento da velocidade a espessura do filme é superior e menos irregular.

O menor valor de coeficiente de atrito aconteceu no ensaio com a velocidade de deslizamento de 1.5 m/s, após a análise da Figura 4.25, pode verificar-se que é o ensaio onde a espessura e estabilidade do filme é superior.

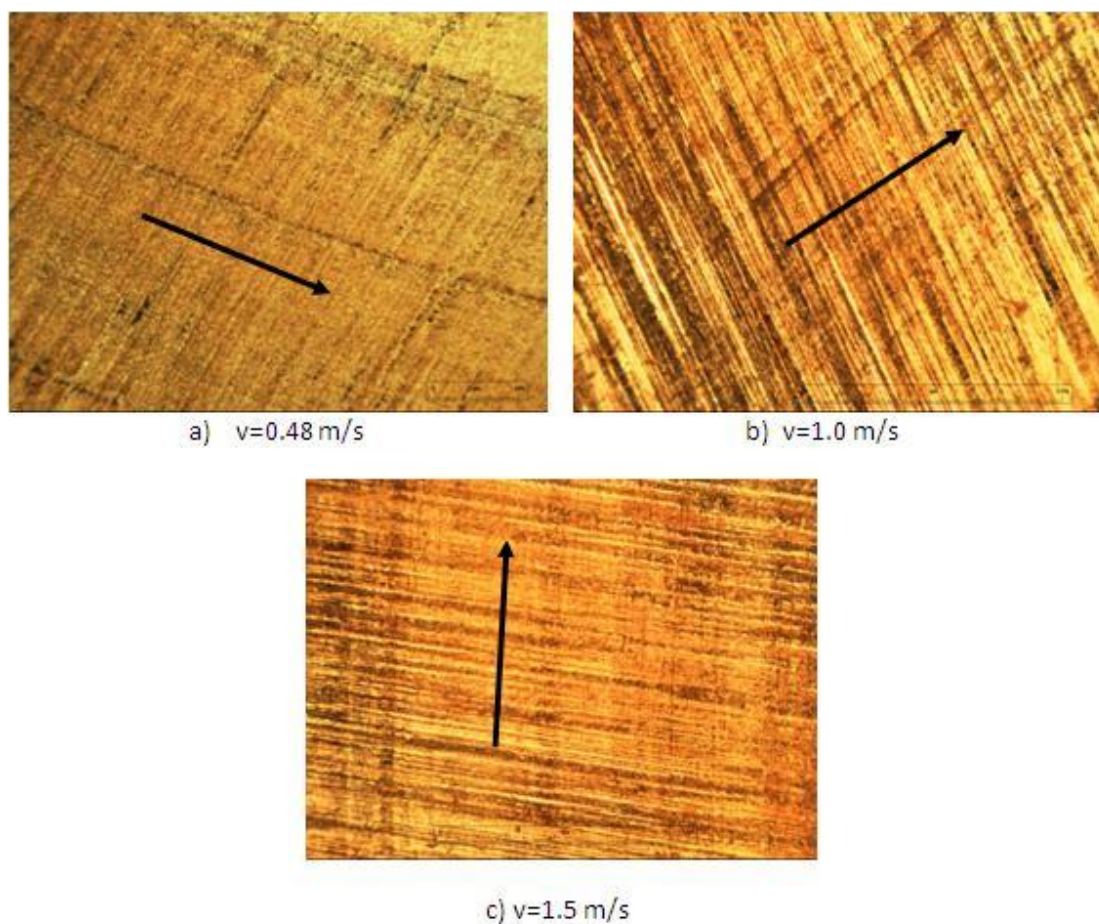


Figura 4.25: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66GF30 a diferentes velocidades de deslizamento.

Na Figura 4.26, estão as imagens obtidas através do MO da superfície das amostras após os ensaios realizados com as velocidades de deslizamento de 1,0 m/s e 1,5 m/s. Tal como no disco, existe uma diferença significativa de um ensaio para o outro. No ensaio realizado à velocidade de 1,5 m/s, Figura 4.26b, são visíveis mais partículas de fibras quebradas mas aderidas ao material do que no ensaio realizado à velocidade de 1,0 m/s.

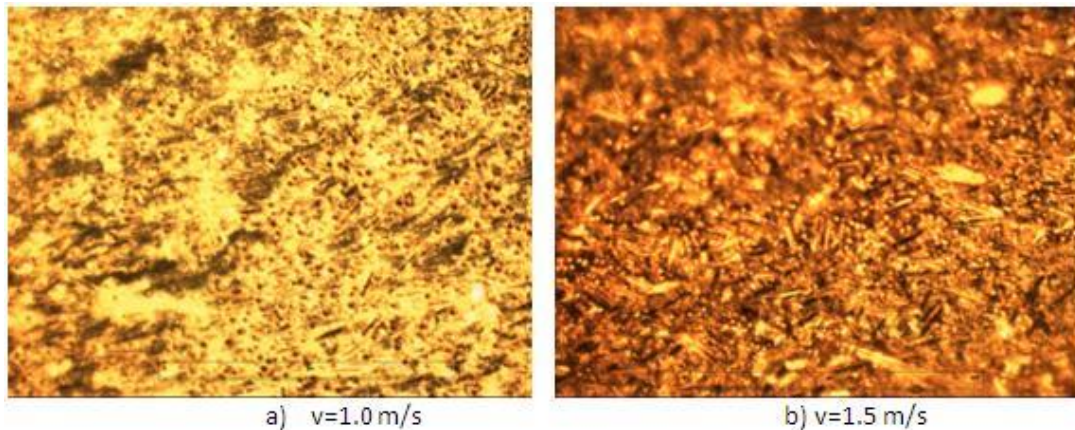


Figura 4.26: Imagens das amostras (MO 50x), após a realização de ensaios da PA66GF30 com a velocidade de deslizamento de 1,0 m/s e com a velocidade de 1,5 m/s.

4.4 Comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF em meio aquoso

Com o objectivo de compreender o comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30 num meio aquoso realizaram-se ensaios com água. Na Tabela 4.10, apresentam-se os valores de pressão de contacto e de velocidade de deslizamento utilizados durante os dois ensaios, a seco e meio aquoso.

Tabela 4.10: Condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios.

	Seco	Meio aquoso
Pressão de Contacto [MPa]	1,04	1,04
Velocidade de deslizamento [m/s]	1	1
Distância percorrida [m]	7500	7500

4.4.1 Estudo tribológico da PA66+MoS₂ em meio aquoso

Na Figura 4.27, pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito, da PA66+MoS₂, em função da distância de deslizamento, num ensaio a seco e num ensaio em

meio aquoso. O comportamento da PA66+MoS₂ é diferente perante um ensaio a seco e um ensaio em meio aquoso. No ensaio em meio aquoso o coeficiente de atrito manteve um valor constante e bastante inferior ao do ensaio a seco.

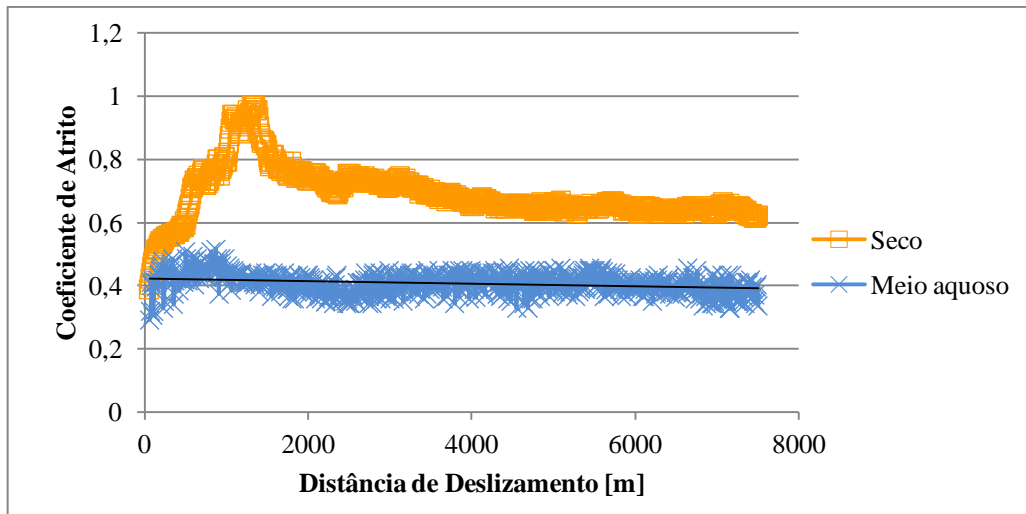


Figura 4.27: Variação do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento, da PA66+MoS₂, para um ensaio a seco e um ensaio meio aquoso.

Na Figura 4.28, apresentam-se os valores de coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, obtidos no ensaio a seco e no ensaio em meio aquoso. Como se pode observar, o coeficiente de desgaste foi bastante penalizado no ensaio em meio aquoso, uma vez que o seu valor aumentou drasticamente.

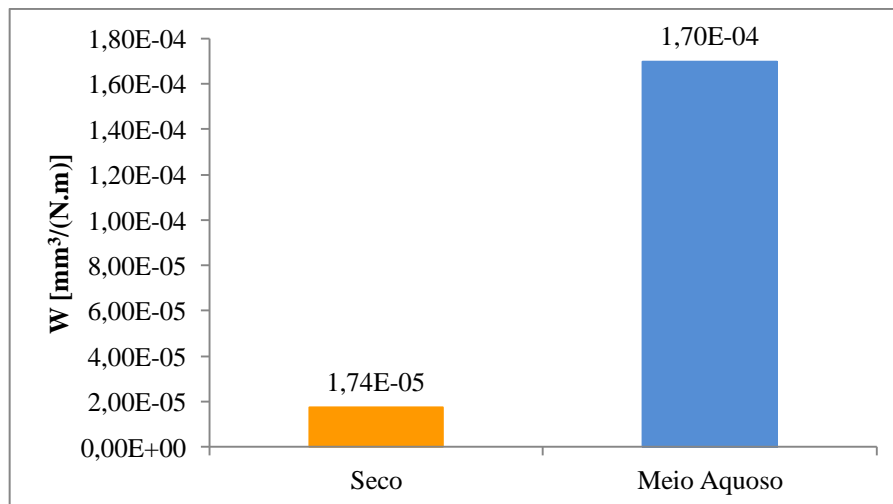


Figura 4.28: Coeficiente de desgaste, W, da PA66+MoS₂, do ensaio a seco e em meio aquoso.

Na Figura 4.29, podem observar-se imagens das amostras após o ensaio da PA66+MoS₂ em meio aquoso pode verificar-se que houve acumulação de material na amostra e no adaptador, mas que esse material era pó. O MoS₂ é um material que tem

tendência a oxidar, então devido às condições de pressão e velocidade em conjunto com o H_2O , pode ter ocorrido oxidação do material, o que provocou a desintegração do material e provocou um aumento do coeficiente de desgaste.



Figura 4.29: Imagem da amostra de MoS_2 , após o ensaio e o material que estava depositado no pino e no adaptador.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados experimentais obtidos após os ensaios realizados à $PA66+MoS_2$ a seco e em meio aquoso, do coeficiente de atrito, μ e do coeficiente de desgaste W , após uma distância de deslizamento de 7500 m.

Tabela 4.11: Resultados experimentais obtidos dos ensaios realizados à $PA66+MoS_2$ a seco e em meio aquoso, do coeficiente de desgaste W , do coeficiente de atrito μ .

Ensaio	W [mm ³ /(N.m)]	μ
Seco	$1,74 \times 10^{-5}$	0,62
Meio aquoso	$16,97 \times 10^{-5}$	0,38

Da análise da Tabela 4.11, pode concluir-se que o coeficiente de atrito diminui quase metade do seu valor no ensaio em meio aquoso. Relativamente ao coeficiente de desgaste aumentou quase dez vezes mais do ensaio a seco para o ensaio em meio aquoso. A água funciona como lubrificante da $PA66+MoS_2$, uma vez que melhora o seu coeficiente de atrito, mas como piora drasticamente a sua resistência ao desgaste, não é um lubrificante eficaz para este material.

4.4.1.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento $PA66+MoS_2$, nos ensaios a seco e em meio aquoso.

Na Figura 4.30, podem observar-se as imagens obtidas através do MO, da superfície dos discos após os ensaios realizados à $PA66+MoS_2$ a seco e em meio aquoso. Da

observação das duas imagens pode concluir-se que a deposição de material no disco é bastante diferente nos dois ensaios. No ensaio em meio aquoso, Figura 4.30b, apenas se vem partículas de material isoladas, o que leva a concluir que a formação do filme não está iminente, contrariamente ao ensaio a seco, que forma uma película de material na superfície do disco.

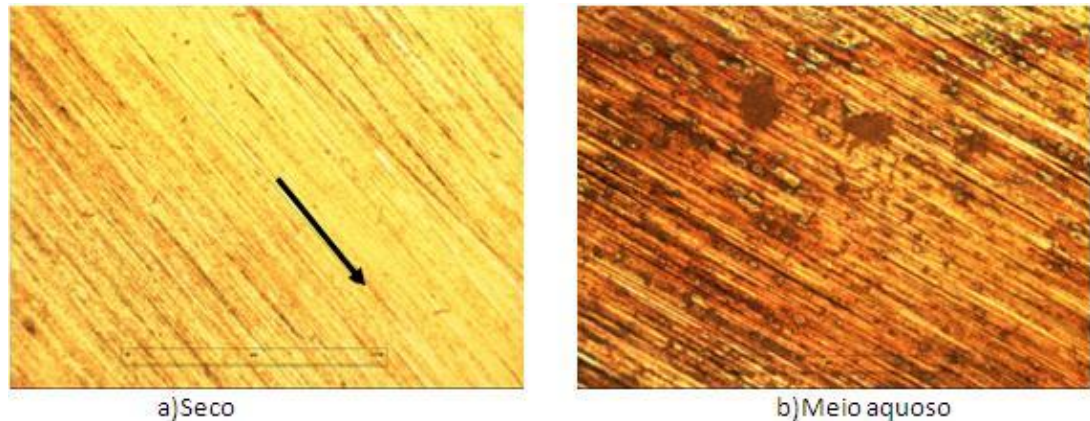


Figura 4.30: Imagens da superfície dos discos obtidas (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66+MoS₂ a seco e em meio aquoso.

4.4.2 Estudo tribológico da PA66GF30 em meio aquoso

A evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento da PA66GF30 para o ensaio a seco e em meio aquoso apresenta-se na Figura 4.31. Existem grandes diferenças na evolução do coeficiente de atrito do ensaio a seco e do ensaio em meio aquoso. O ensaio em meio aquoso apresenta um coeficiente de atrito baixo e constante ao longo do ensaio.

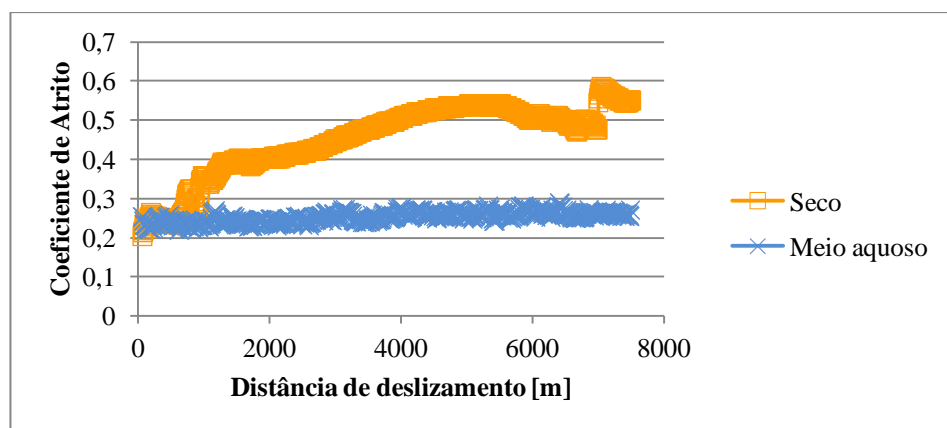


Figura 4.31: Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, da PA66GF30, para um ensaio a seco e num ensaio em meio aquoso.

Na Figura 4.32, apresentam-se os valores de coeficiente de desgaste obtido para a PA66GF30 no ensaio a seco em meio aquoso. Os valores apresentados para os dois ensaios são completamente diferentes. No ensaio em meio aquoso o seu valor é bastante inferior ao do ensaio a seco.

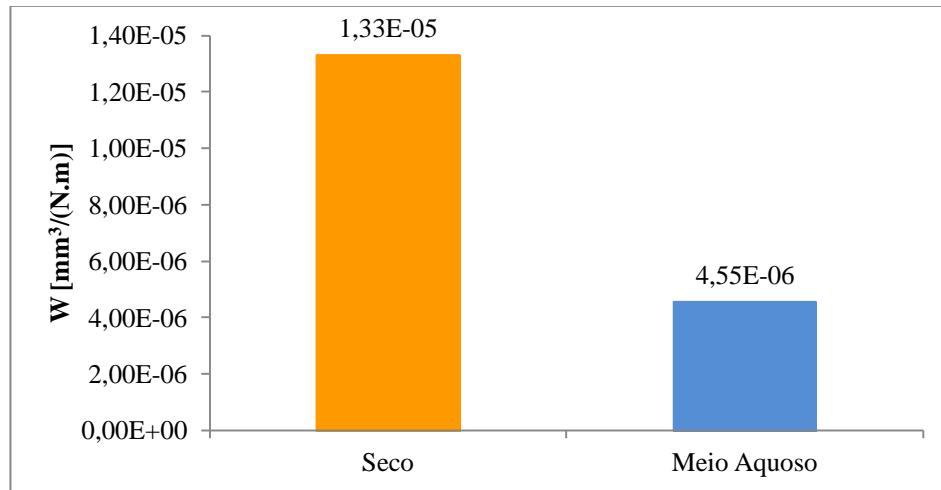


Figura 4.32: Coeficiente de desgaste, W, da PA66GF30, do ensaio a seco e meio aquoso.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados experimentais obtidos após os ensaios da PA66GF30 a seco e em meio aquoso, do coeficiente de atrito, μ e do coeficiente de desgaste W após uma distância de deslizamento de 7500 m.

Tabela 4.12: Resultados experimentais obtidos nos ensaios a seco e em meio aquoso da PA66GF30 do coeficiente de desgaste W, do coeficiente de atrito μ .

Ensaio	W [mm³/(N.m)]	μ_s
Seco	$1,33 \times 10^{-5}$	0,57
Meio aquoso	$0,46 \times 10^{-5}$	0,26

Da análise da Tabela 4.12, pode concluir-se que é vantajoso utilizar a PA66GF30 em meios aquoso. A água funcionou como um lubrificante neste material, uma vez que reduziu o seu coeficiente de atrito, neste ensaio em cerca de metade. O coeficiente de desgaste também ficou favorecido na presença da água, uma vez que no ensaio lubrificado o seu valor foi cerca de dois terços inferior ao do ensaio a seco.

4.4.2.1 Comparação das superfícies dos discos após o deslizamento PA66GF30, nos ensaios a seco e em meio aquoso.

Na Figura 4.33 podem observar-se as imagens da superfície dos discos obtidas através do MO, após a realização dos ensaios da PA66GF30 a seco e em meio aquoso. Em ambos os ensaios há deposição de material, contudo no ensaio lubrificado existe menos material aderido ao disco. Da análise da Figura 4.33a, pode observar-se que os mecanismos de desgaste envolvidos no ensaio a seco são predominantemente a adesão, a abrasão e a formação de tribofilme. Relativamente ao ensaio lubrificado, Figura 4.33b, os mecanismos de desgaste envolvidos no ensaio são predominantemente a adesão.

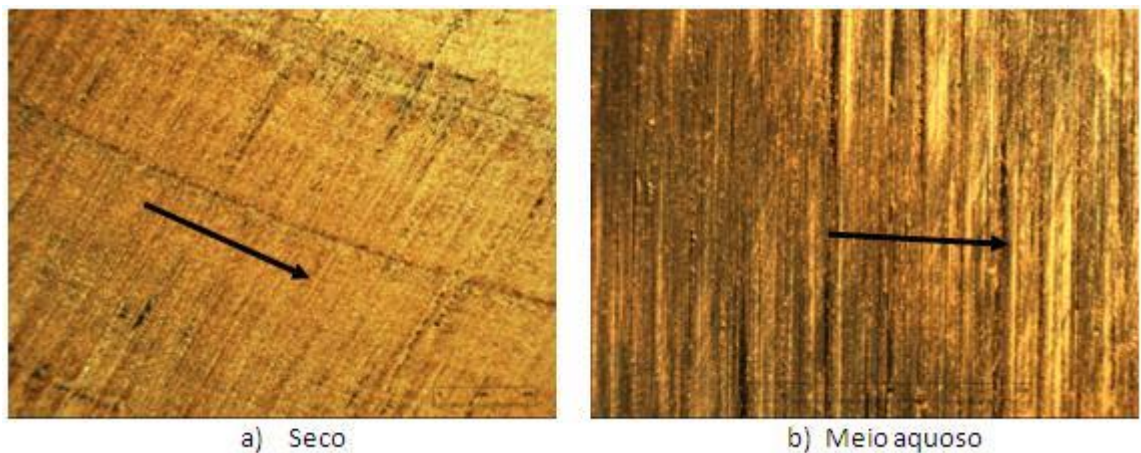


Figura 4.33: Imagens da superfície dos discos (MO 50x), após a realização de ensaios com a PA66GF30 a seco e em meio aquoso.

CONCLUSÕES

CAPÍTULO

5

CONCLUSÕES

Ao longo do presente trabalho foram realizados estudos tribológicos, divididos em quatro fases distintas, à poliamida 66, e a dois dos seus compósitos (poliamida 66 com 30% de reforço de fibra de vidro e a poliamida 66 com a adição de bissulfureto de molibdénio).

Na primeira fase do trabalho, realizou-se uma comparação do comportamento tribológico dos três materiais (PA66, PA66+MoS₂, PA66GF30), em deslizamento a seco, para as mesmas condições de pressão de contacto (1,46 MPa) e velocidade de deslizamento (0,48 m/s). Destes ensaios retiram-se as seguintes conclusões:

- o material que apresentou menor valor de coeficiente de atrito, foi a PA66GF30 (0,39) e o material que apresentou maior valor de coeficiente de atrito foi a PA66 (0,60);
- o material que obteve menor coeficiente de desgaste foi a PA66GF30 ($1,01 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$) e o material que apresentou maior valor foi a PA66+MoS₂ ($1,96 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$).

Para estas condições de pressão e velocidade, o material que apresentou um melhor comportamento tribológico (menor coeficiente de atrito e maior resistência ao desgaste), foi a PA66GF30. Ou seja o reforço da poliamida com fibra de vidro, pode ser bastante vantajoso em algumas aplicações. Relativamente à PA66+MoS₂, neste tipo de solicitação não acarreta grandes vantagens em relação à PA66, uma vez que apenas melhorou ligeiramente o seu comportamento ao atrito, mas penalizou o seu comportamento ao desgaste.

Numa segunda fase, estudou-se a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico dos três materiais em estudo, em deslizamento a seco, mantendo constante a velocidade de deslizamento (0,48 m/s). Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios efectuados, tiram-se as seguintes conclusões:

- o coeficiente de desgaste aumentou perante o aumento da pressão de contacto para os três materiais em estudo;
- o coeficiente de atrito da PA66 tendeu a diminuir com o aumento da pressão aplicada;
- os valores de coeficiente de atrito da PA66, obtidos nos ensaios efectuados a diferentes pressões de contacto, estão compreendidos entre 0,45 e 0,67;
- os valores de coeficiente de atrito da PA66+MoS₂, obtidos nos ensaios efectuados a diferentes pressões de contacto, estão compreendidos entre 0,54 e 0,67;
- os valores de coeficiente de atrito da PA66GF30, obtidos nos ensaios efectuados a diferentes pressões de contacto, estão compreendidos entre 0,39 e 0,62.

Com estes ensaios conclui-se que a pressão de contacto é um factor que influencia fortemente o comportamento tribológico dos materiais em estudo. O comportamento tribológico da PA66 e da PA66+MoS₂, foram semelhantes no que consta ao atrito, contudo o coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, foi sempre superior ao apresentado pela PA66, para as mesmas condições de ensaio. Ou seja a PA66+MoS₂, nesta gama de valores de pressão de contacto e velocidade de deslizamento não acarreta vantagens no comportamento tribológico da PA66.

Numa terceira fase realizaram-se ensaios à PA66GF30 e à PA66+MoS₂ com o objectivo de compreender a influência da velocidade de deslizamento no seu comportamento tribológico, com diferentes velocidades de deslizamento, mantendo a pressão de contacto constante (1,04 MPa). As conclusões mais relevantes retiradas após a realização dos ensaios são as seguintes:

- o coeficiente de atrito da PA66+MoS₂, parece não sofrer grandes alterações com o aumento da velocidade;
- o coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, aumentou com a velocidade de deslizamento aplicada, o valor mais elevado ($12,6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$) foi atingido no ensaio com a velocidade de 1,5 m/s e é relativamente superior aos dos outros ensaios ($0,90 \times 10^{-5}$, $1,74 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$);

- a PA66GF30, demonstra uma tendência em diminuir o coeficiente de atrito perante o aumento da velocidade de deslizamento;

Com estes ensaios conclui-se que para a gama de velocidades ensaiadas, a velocidade de deslizamento é um parâmetro que influencia o comportamento tribológico da PA66+MoS₂ e da PA66GF30. No caso da PA66+MoS₂ a velocidade de deslizamento influenciou consideravelmente o seu comportamento ao desgaste, sem penalizar o seu comportamento ao atrito. Relativamente à PA66GF30 o aumento da velocidade de deslizamento, aparenta ser benéfico, por demonstrar uma tendência em diminuir o coeficiente de atrito.

Numa quarta fase realizaram-se ensaios em meio aquoso, para verificar a influência da água no comportamento tribológico da PA66GF30 e da PA66+MoS₂. Dos ensaios efectuado tiram-se as seguintes conclusões:

- em ambos os materiais a água funcionou como lubrificante, uma vez que reduziu o coeficiente de atrito em relação ao ensaio a seco;
- o coeficiente de desgaste da PA66+MoS₂, no ensaio lubrificado ($16,97 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$) aumentou drasticamente em relação ao ensaio a seco ($1,74 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$);
- o coeficiente de desgaste da PA66GF30 diminuiu consideravelmente do ensaio lubrificado ($0,46 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$) em relação ao ensaio a seco ($1,33 \times 10^{-5}$).

Estes ensaios permitiram concluir que a PA66GF30 e a PA66+MoS₂ tem comportamentos bastante distintos perante a adição de água. A PA66+MoS₂ não é apropriada para utilizar em meios aquosos. Pelo contrário a PA66GF30 tem um bom desempenho tribológico quando utilizada em meios aquosos.

A observação ao microscópio óptico das superfícies de deslizamento do disco após cada ensaio permitiram concluir que os mecanismos de desgaste predominantes, foram a adesão e a formação de tribofilme assim como a abrasão no caso particular da PA66GF30. Contudo é de salientar que para uma melhor interpretação dos mecanismos de desgaste, deveriam recolher-se imagens através do microscópio de varrimento.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- ANONYMOUS 1995. *Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers*, Norwich (NY), Plastics Design Library.
- BAYER, R. G. 2002. *Wear Analysis for Engineers*, New York, HNB Publishing.
- BERMÚDEZ, M. D., CARRIÓN-VILCHES, F. J., MARTÍNEZ-MATEO, I. & MARTÍNEZ-NICOLÁS, G. 2001. Comparative study of the tribological properties of polyamide 6 filled with molybdenum disulfide and liquid crystalline additives. *Journal of Applied Polymer Science*, 81, 2426-2432.
- BRANDRUP, J. 1999. *Polymer handbook*, New York, John Wiley.
- BRYDSON, J. A. 1995. *Plastics materials*, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- CHANG, L., ZHANG, Z., ZHANG, H. & SCHLARB, A. K. 2006. On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites. *Composites Science and Technology*, 66, 3188-3198.
- CHARLES, D. F., GNANAMOORTHY, R. & RAVINDRAN, P. 2010. Rolling contact fatigue behavior of polyamide clay reinforced nanocomposite—Effect of load and speed. *Wear*, 269, 565-571.
- CHEN, Y. K., MODI, O. P., MHAY, A. S., CHRYSANTHOU, A. & O'SULLIVAN, J. M. 2003. The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact. *Wear*, 255, 714-721.
- CHEN, Z. B., LI, T. S., LIU, X. J. & LU, R. G. 2005. Friction and wear mechanisms of polyamide 66/high density polyethylene blends. *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, 43, 2514-2523.
- FAHIM, M. & DAVIM, J. P. 2010. Tribology of Functionalised Carbon Nanofillers Based Polymer Composites. In: DAVIM, J. P. D. (ed.) *Tribology of Composite Materials*. New York: NOVA Publishers.
- FEYZULLAHOGLU, E. & SAFFAK, Z. 2008. The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions. *Materials & Design*, 29, 205-211.
- FRANKLIN, S. E. 2001. Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions. *Wear*, 251, 1591-1598.
- GUSTAFSON, P. A. & WAAS, A. M. 2006. Determining the response of glass filled nylon under elevated rate multiaxial loading. *Polymer Testing*, 25, 481-491.
- HABIB S, B. 2007. Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions. *Tribology International*, 40, 64-73.
- HOOKE, C. J., KUKUREKA, S. N., LIAO, P., RAO, M. & CHEN, Y. K. 1996. The friction and wear of polymers in non-conformal contacts. *Wear*, 200, 83-94.

- KUKUREKA, S. N., HOOKE, C. J., RAO, M., LIAO, P. & CHEN, Y. K. 1999. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107-116.
- KURTZ, M. 2006. *Mechanical Engineers' Handbook Material and Mechanical Design*, New Jersey Wiley.
- LAURENCE W, M. 2008. *Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers* Norwich, NY, William Andrew Publishing.
- LIU, C. Z., REN, L. Q., TONG, J., GREEN, S. M. & ARNELL, R. D. 2002. Effects of operating parameters on the lubricated wear behavior of a PA-6/UHMWPE blend: a statistical analysis. *Wear*, 253, 878-884.
- MENG, H., SUI, G. X., XIE, G. Y. & YANG, R. 2009. Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology*, 69, 606-611.
- MIRI, V., PERSYN, O., LEFEBVRE, J. M. & SEGUELA, R. 2009. Effect of water absorption on the plastic deformation behavior of nylon 6. *European Polymer Journal*, 45, 757-762.
- RAJESH, J. J., BIJWE, J. & TEWARI, U. S. 2002. Abrasive wear performance of various polyamides. *Wear*, 252, 769-776.
- RYMUZA, Z. 2007. Tribology of polymers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, VII, 177-184.
- SAMYN, P., DE BAETS, P., KERESZTES, R., ZSIDAI, L., KALACSKA, G., KISLINDER, E. & KOZMA, M. 2007a. Influence of cylinder-on-plate or block-on-ring sliding configurations on friction and wear of pure and filled engineering polymers. *Tribotest*, 13, 83-100.
- SAMYN, P., DE BAETS, P., SCHOUKENS, G. & VAN DRIESSE, I. 2007b. Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales. *Wear*, 262, 1433-1449.
- SMITH, W. F. 1998. *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*, Lisboa, McGraw-Hill.
- SRINATH, G. & GNANAMOORTHY, R. 2007. Sliding wear performance of polyamide 6-clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology*, 67, 399-405.
- STACHOWIAK, G. W. 2005. *Engineering tribology*, Boston, Butterworth-Heinemann.
- UNAL, H. & MIMAROGLU, A. 2003. Friction and wear behaviour of unfilled engineering thermoplastics. *Materials & Design*, 24, 183-187.
- UNAL, H., MIMAROGLU, A. & SERDAR, V. 2006. Dry sliding performance of thermoplastics against reinforced unsaturated polyester (BMC): In use in electrical contact breakers components. *Wear*, 261, 841-847.
- UNAL, H., SEN, U. & MIMAROGLU, A. 2004. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*, 37, 727-732.
- UNAL, H., SEN, U. & MIMAROGLU, A. 2005. Abrasive wear behaviour of polymeric materials. *Materials & Design*, 26, 705-710.

- VAN DE VELDE, F. & DE BAETS, P. 1997. The friction and wear behaviour of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact pressures. *Wear*, 209, 106-114.
- WANG, H. G., REN, J. F., JIAN, L. Q., PAN, B. L., ZHANG, J. Y. & YANG, S. R. 2008. Friction and Wear Behavior of Polyamide 66/Poly(vinylidene fluoride) Blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 47, 701-711.
- WANG, J., GU, M., SONGHAO, B. & GE, S. 2003. Investigation of the influence of MoS₂ filler on the tribological properties of carbon fiber reinforced nylon 1010 composites. *Wear*, 255, 774-779.
- XING, Y., ZHANG, G., MA, K., CHEN, T. & ZHAO, X. 2009. Study on the Friction and Wear Behaviors of Modified PA66 Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48, 633-638.
- YU, S., HU, H. & YIN, J. 2008. Effect of rubber on tribological behaviors of polyamide 66 under dry and water lubricated sliding. *Wear*, 265, 361-366.
- ZHANG, S. W. 1998. State-of-the-art of polymer tribology. *Tribology International*, 31, 49-60.

ANEXO

A. MANUAL DE UTILIZAÇÃO SIMPLIFICADO TRIBÓMETRO PLINT TE67

1. Introdução

Este manual destina-se a informar o utilizador do modo de funcionamento do tribómetro *PLINT TE67*, do software de apoio *Compend 2000* de uma forma simplificada assegurando as medidas de segurança para um correcto funcionamento.

Os principais parâmetros (a ser variados) utilizados são:

Velocidade:

Desde zero (a partir de um raio muito pequeno) até:

- 4 m/s (a 1000 rpm e 39 mm de raio)

Carga:

- 5N a 100N (carga por massa)
- 50N a 700N (carga pneumática, com ar comprimido a 5 bar)

Temperatura:

- Ambiente até 200° usando o sistema de aquecimento de ar com a superfície do disco exposta
- Ambiente até 400° usando o sistema de aquecimento de ar com a superfície do disco protegida
- Ambiente até 750° usando o sistema de aquecimento alimentado a gás

2. Montagens do equipamento

O tribómetro, permite, fazer diferentes tipos de testes. Desde ensaios com cargas baixas até cargas de 700 N, também permite fazer ensaios com lubrificação, ensaios isolados, com variação de temperatura e de velocidade. Contudo para se fazerem alguns destes ensaios é necessário alterar/acrescentar acessórios do tribómetro.

i. Montagem da célula de carga (força de atrito)

A célula de carga da força de atrito, Figura 1 é um componente muito importante do tribómetro, uma vez que permite a medição da força de atrito. Para boa preservação deste equipamento, é necessário ter alguns cuidados na montagem e na sua utilização. Existem duas células de carga, uma de 5Kgf, que é utilizada **SOMENTE** no sistema de pesos mortos (baixa carga) e a outra de 100 Kgf que é utilizada no sistema pneumático. A célula de carga tem dois parafusos acoplados que devem ser apertados como se vê na Figura 2, o fio deve ser ligado no respectivo local no painel de controlo. Posteriormente devem colocar-se os componentes de aperto, Figura, tendo o cuidado de apertar o parafuso só o estritamente necessário, para não danificar.

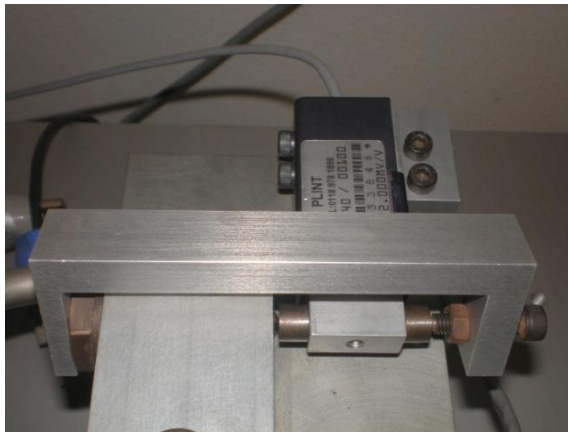


Figura 1: Célula de carga no respectivo local de utilização.



Figura 2: Componentes de aperto da célula de carga.

ii. Sistema de pesos mortos

O sistema de pesos mortos, Figura 3, é utilizado para cargas baixas até 50 N. Como o peso das cargas é relativamente baixo, deve-se utilizar a **célula de carga de 5 Kgf**. Para se utilizar este sistema é necessário montar os acessórios da Figura 4. Caso esteja o sistema pneumático ligado, devem desligar-se todas as ligações, desde o ar comprimido, o fio vermelho, etc... Posteriormente, retira-se a bucha de aperto e faz-se a extracção deste sistema, desapertando todos os parafusos necessários. Finalmente está-se em condições de proceder à montagem do sistema de pesos mortos. O primeiro acessório a ser montado é o da Figura 4A, este acessório é montado na respectiva posição na base da cabeça do tribómetro, posteriormente monta-se o acessório da Figura 4B, que tem aperto na parte superior da cabeça com os respectivos parafusos e anilhas, seguidamente coloca-se o suporte dos pesos, Figura 4C dentro da base dos pesos mortos e finalmente colocam-se os pesos desejados, faz-se a ligação do fio vermelho no respectivo sítio, (cabeça do tribómetro e painel de controlo).



Figura 3: Sistema de pesos mortos.

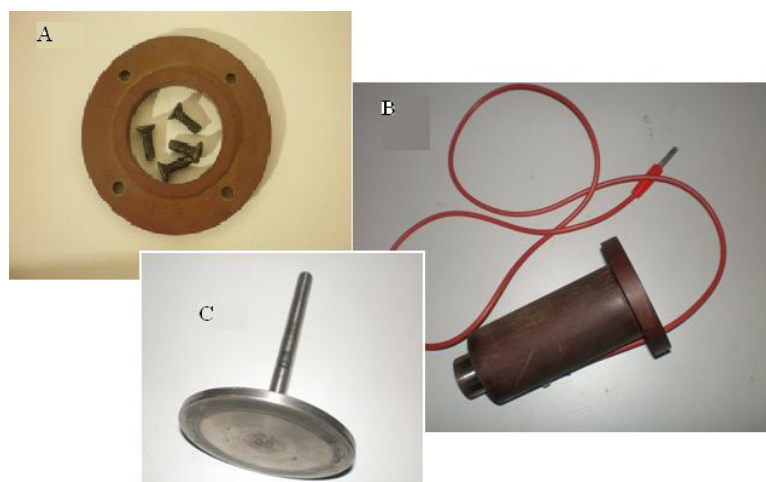


Figura 4: Componentes utilizados na montagem do sistema de pesos mortos.

iii. Sistema pneumático

O sistema pneumático Figura 5, é utilizado quando se pretendem utilizar cargas superiores a 50 N. Para **NÃO DANIFICAR**, a célula de carga utilizada deve ser a de **100 Kgf** (referência AW440/00100). Este sistema é constituído por três partes, Figura 6, a parte superior onde está o sistema de ar comprimido, uma anilha que é colocada na parte superior da cabeça do tribómetro e um conjunto de cinco parafusos com as respectivas anilhas e encaixes. Após se colocar a anilha na cabeça do tribómetro, coloca-se a parte superior do sistema, na posição correcta, posteriormente faz-se o aperto com os respectivos parafusos, liga-se o sistema de ar comprimido. Ligam-se os fios respeitando os seus locais, **posições e encaixes**.

Muda-se a célula de carga da força de atrito para 100 Kgf.

ATENÇÃO: Verificar se a célula de carga é a adequada ao sistema (100 Kgf)



Figura 5: Sistema pneumático.

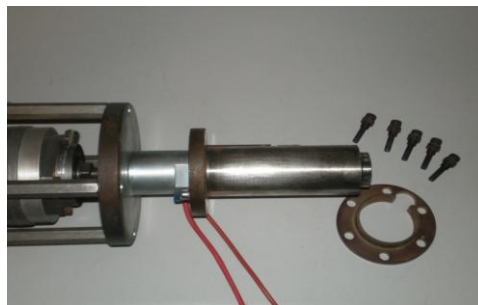


Figura 6: Componentes utilizados na montagem do sistema pneumático.

iv. Sistema de lubrificação

O sistema de lubrificação Figura 7 é constituído por três elementos, Figura 8 com este sistema pode-se ir adicionando lubrificante ao longo do ensaio. Permite que o líquido não se espalhe para fora do disco, contudo, tem que se ter atenção e colocar pouca quantidade de lubrificante de cada vez. Este sistema é instalado junto ao porta discos, em primeiro lugar coloca-se o vedante na ranhura existente no porta discos, posteriormente coloca-se a peça mais larga e finalmente a tina.

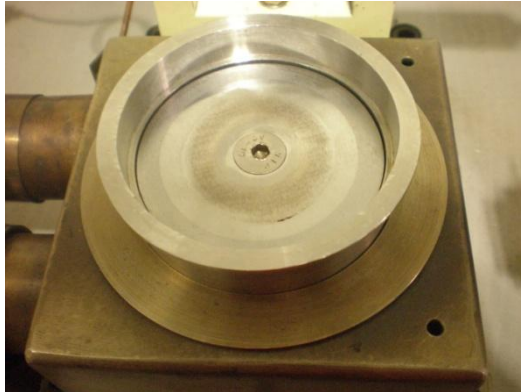


Figura 7: Sistema de lubrificação.



Figura 8: Três componentes utilizados na montagem do sistema de lubrificação.

Quando se efectuam testes com lubrificação com temperatura até 200°C, tem que se recorrer ao termopar para se poder ler a temperatura durante o ensaio. Para tal, monta-se o termopar no dispositivo de fixação, e no painel de controlo substitui-se a ligação do pirómetro óptico pela do termopar.

v. Sistema de isolamento

O sistema de isolamento é constituído por apenas uma peça, como se pode verificar na Figura . Essa peça encaixa em dois buracos na parte direita da base do porta discos.



Figura 9: Sistema de isolamento.

vi. Sistema de aquecimento

O aquecimento pode ser feito, com auxílio de dois tipos de sistemas, dependendo da temperatura desejada. Na Figura 10A, tem-se o sistema de aquecimento de ar simples, este sistema é regulado através do software, para tal deve estar devidamente ligado no painel de controlo do tribómetro e no painel de alimentação no respectivo local. Quanto ao sistema de aquecimento a gás, Figura 10B, também necessita estar ligado no painel de alimentação e no de controlo, para além de estar ligado a uma botija de gás. Quando um sistema estiver ligado, desligar o outro, caso não seja necessário utilizar sistema de aquecimento, podem estar os dois sistemas desligados.

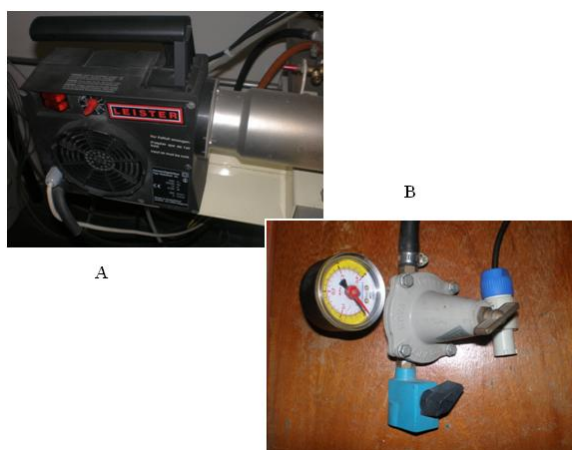


Figura 10: Sistemas de aquecimento.

3. Ligar o Tribómetro

ATENÇÃO:

Nunca ligar o botão “MAINS ON/OFF” da caixa de controlo antes do computador, software e máquina devidamente ligados.

Passos a seguir:

- Ligar o computador afecto à máquina.
- Abrir o software Compend 2000 com atalho no ambiente de trabalho Figura 11.



Figura 11: Ícone de atalho ao programa Compend 2000.

- Ligar a máquina no “switch” vermelho (localizado ao canto inferior direito) girando-o 45° no sentido dos ponteiros do relógio.
- Ligar o botão de pressão “MAINS ON/OFF” na caixa de controlo.
- Ligar o botão RESET, na caixa de controlo, para que o motor possa funcionar.

i. Programar um teste

Todos os testes realizados na máquina são programados no software de apoio, Compend 2000, Figura 12.

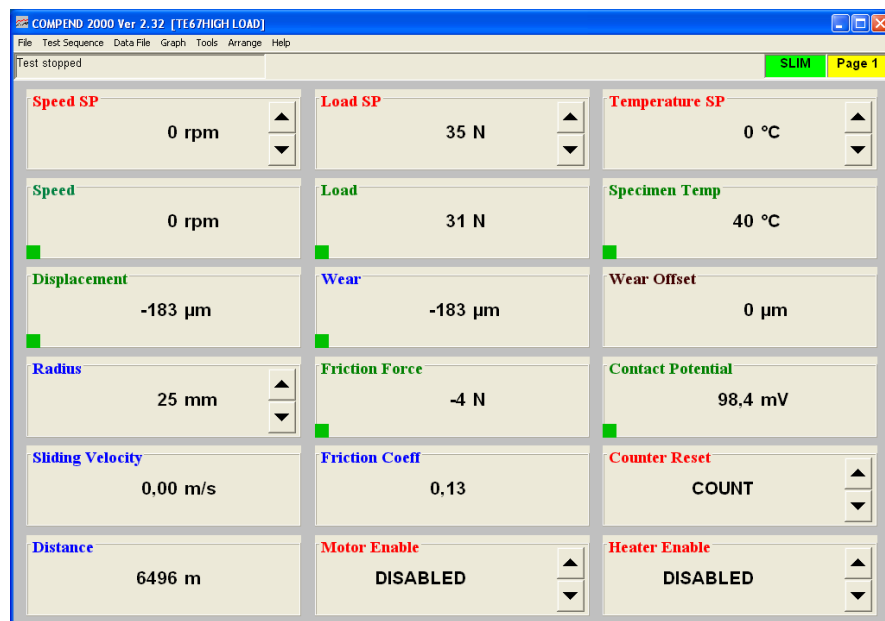


Figura 12: Ambiente de base do software para um te67High load.

1. Definição do Setup — File-Load Setup. Entenda-se por “Setup” a configuração do software em função do teste a realizar.

a) Escolher o “Setup” mais adequado ao teste a realizar. O programa possui diferentes configurações, tem se escolher consoante o tipo de sistema que se pretenda utilizar. Antes de escolher o setup, o sistema já deve estar previamente montado. As opções disponíveis (criadas pelo fabricante) são:

- te67High load.CFG- Utilizado para cargas elevadas com o sistema pneumático.
- te67Low load.CFG- Utilizado para cargas com o sistema de pesos mortos.
- te67sine.CFG- Parâmetros em sinusóide.

ii. Definição e parametrização do teste a realizar (“Test Sequence”) — Test Sequence/Create Blank.

Quando se selecciona uma nova sequência de teste, aparecem dois novos quadros — “Test Control Panel” e “Test File View”, Figura 13.

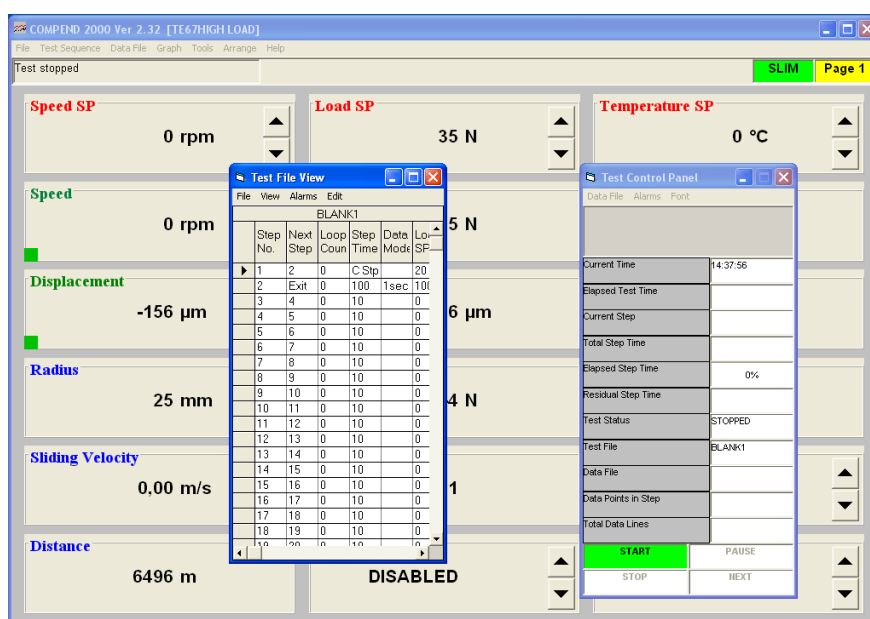
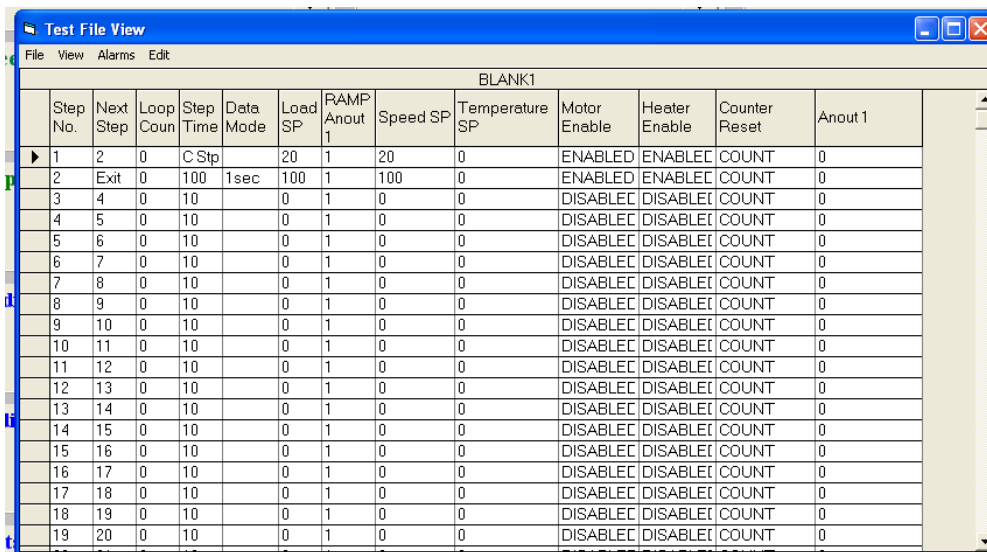


Figura 13: Definição de uma sequência de teste- Painéis “Test File View” e “Test Control Panel.

O painel “Test File View” permite ao utilizador definir a sequência de passos a seguir, assim como estabelecer e quantificar os parâmetros necessários à realização do teste.

O painel “Test Control Panel” funciona como painel de controlo. Assim, poder-se-á iniciar, parar ou acabar um teste sempre que desejável, bem como visualizar a situação actual das sequências definidas.

1. Definição do “Test File View”, Figura 14.



Step No.	Next Step	Loop Count	Step Time	Data Mode	Load SP	RAMP Anout 1	Speed SP	Temperature SP	Motor Enable	Heater Enable	Counter Reset	Anout 1
1	2	0	C Stp		20	1	20	0	ENABLED	ENABLED	COUNT	0
2	Exit	0	100	1sec	100	1	100	0	ENABLED	ENABLED	COUNT	0
3	4	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
4	5	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
5	6	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
6	7	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
7	8	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
8	9	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
9	10	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
10	11	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
11	12	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
12	13	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
13	14	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
14	15	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
15	16	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
16	17	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
17	18	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
18	19	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0
19	20	0	10		0	1	0	0	DISABLED	DISABLED	COUNT	0

Figura 14: “Test File View”.

a) Estabelecer um passo.

Os passos (linhas), são definidos pelos diferentes parâmetros designados (colunas). Assim, na intersecção do passo com as diferentes colunas (com um “clik” na respectiva célula”) podem ser estabelecidos os seguintes parâmetros:

- O próximo passo, Figura 15: uma subrotina ou o fim do programa;

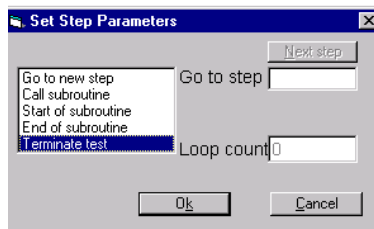


Figura 15: Painei onde é especificado o próximo passo.

- O número de vezes a executar o mesmo passo;
 - A duração do passo;
- O modo de recolha de dados, Figura 16;

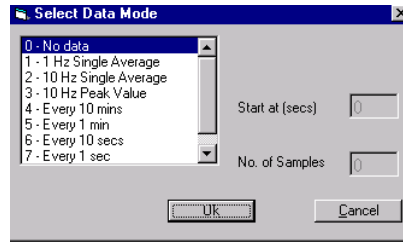


Figura 16:Painel onde é definido o modo de recolha de informação.

- A carga a aplicar e tempo de rampa (de 1 a 10000 segundos), Figura 17. O tempo de rampa é o tempo necessário para o parâmetro, neste caso a carga, atingir o valor especificado.

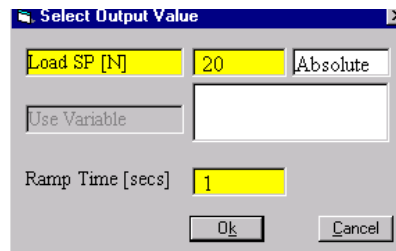


Figura 17:Painel onde é especificada a carga a aplicar e o tempo de rampa correspondente.

- A velocidade a aplicar e tempo de rampa.
- A temperatura a aplicar e tempo de rampa.
- O estado de funcionamento do motor, colocar **enabled** quando é suposto ele estar ligado.
- O estado de funcionamento do aquecedor de ar.
- O estado do contador.

Todos os passos devem ser definidos de acordo com o estabelecido anteriormente. No entanto, o último passo deve ser parametrizado especificando-se na respectiva célula de “next step” como “Terminate test”, Figura 18.

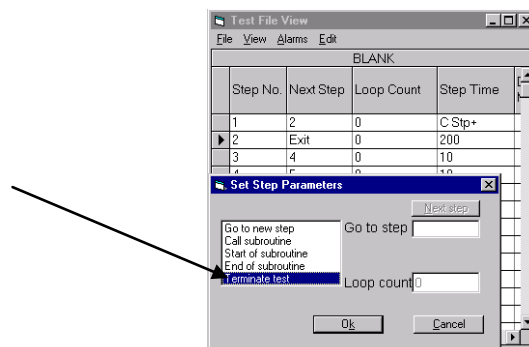


Figura 18: Especificação de que o teste terminará após a conclusão do passo seleccionado.

- Definição dos alarmes de teste, Figura 19, caso seja necessário — Alarms.

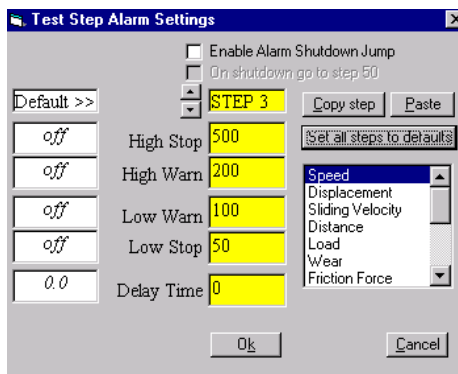


Figura 19:Definição de alarmes e avisos

Os alarmes e avisos são especificados com valores numéricos, ou quando desactivados, com a palavra *off*. Os alarmes podem ser desactivados na sua íntegra para todos os passos.

Após todas as alterações efectuadas, guarda-se o respectivo Test File View com o nome pretendido, numa pasta no ambiente de trabalho, para assim evitar conflitos de permissão.

2. Utilização do “Test Control Panel”, Figura 20.

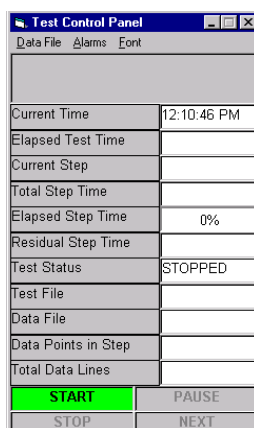


Figura 20:“Test Control Panel”.

- Atribuir ficheiro para salvaguarda dos dados colhidos durante a execução do teste — em **Data File\ View Data File in Excel**, selecciona-se uma pasta no ambiente de trabalho, onde se pretendam

guardar os ficheiros, posteriormente escreve-se o nome pretendido e pressiona-se em open.

- b) Desactivar alarmes — Alarms\Alarms Disabled. Todos os alarmes são desactivados.

iii. Iniciar um teste

Depois de definidos todos os passos descritos nas alíneas anteriores, voltando ao quadro principal e seleccionando as opções — Graph\Create Graph e Arrange, o teste está pronto a iniciar. A selecção Graph\Create Graph permite a visualização gráfica em tempo real de um conjunto de parâmetros predefinidos. A opção Arrange distribui de uma forma ordenada os diferentes painéis pelo monitor.

- Colocar o pino na bucha de aperto a ele destinada, fazer o aperto mínimo possível, ou seja o suficiente para que o pino não caia, assim evita-se a danificação da bucha. No lado esquerdo da máquina, está uma régua, Figura 21, que permite verificar o raio utilizado no disco, caso seja necessário alterar o raio, desapertam-se os quatro parafusos e movimenta-se a cabeça da máquina para a frente ou para trás conforme o pretendido. Se o raio não coincidir com o que está demonstrado no software, altera software na parte que diz *radius*.



Figura 21: Régua que mede o raio que está a ser utilizado no disco.

- O teste inicia-se com um “clik” em **START** no painel “Test Control Panel”. É possível ainda proceder às seguintes operações:
 - Fazer uma pausa- **PAUSE**, (Esta pausa, só pára a aquisição de dados e o decorrer do programa, não pára o motor e a carga aplicada).
 - Avançar para o próximo passo- **NEXT**;
 - Parar o teste- **STOP**.

O programa terminará, salvo acção em contrário, automaticamente após a conclusão do último passo especificado ou desactivado por algum alarme.

iv. Visualização da informação em ficheiro do “Excel”

Após o término do teste a informação pode ser visualizada sob a forma de ficheiro (de acordo com o estabelecido no ponto 4). O ficheiro pode ser aberto no programa através da opção — Data **File\View Data File in Excel**, no painel “Test Control Panel”, ou abrindo no local onde se encontra o ficheiro guardado. Para melhor manipular os dados, deve-se mudar a extensão do ficheiro para um tipo de ficheiro reconhecido pelo Excel de outro computador (Ex: xls).

v. Desligar a máquina

Após o(s) testes efectuado(s) o equipamento disponível deve ser desligado pela seguinte ordem:

- 1º- Caixa de controlo- Botão de pressão “MAINS ON/OFF”.
- 2º- Tribómetro- “switch” vermelho.
- 3º- Computador e monitor.

vi. Limpeza e arrumação

Após o(s) teste(s) efectuado(s) a máquina deve ser limpa e arrumada de forma a ficar tal como no estado inicial.

4. Notas finais

- Quando se quer apenas verificar se o motor, ou o sistema pneumático ou ainda o sistema de aquecimento estão a funcionar, sem realizar nenhum programa. Basta no menu principal do software, dar um valor ao componente que se quer verificar. No caso do motor e da carga colocar enabled, movendo as setas para cima ou para baixo, consoante o pretendido.
- Antes de efectuar um teste aparecem valores de carga entre 0-10 N, ignorar, uma vez que tem a ver com a calibração, os valores da força de atrito, também podem estar entre -1 e 5 N.
- O sistema de isolamento é utilizado quando se pretendem obter temperaturas até com o sistema de aquecimento de ar até aos 400°C.